



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Penelitian Terkait

Penelitian tugas akhir ini akan dilakukan studi literatur yang merupakan mencari referensi landasan teori yang relevan dengan penelitian yang akan dilakukan. Refensi teori dapat berasal dari buku dan jurnal ilmiah.

Pada penelitian yang berjudul penggunaan sistem panel surya untuk penggunaan sendiri pada stasiun pengisian bahan bakar umum di Nairobi Barat, penelitian ini membandingkan harga dari penggunaan mesin diesel dengan penggunaan sistem panel surya selama terjadi pemadaman listrik. Konsumsi peralatan listrik pada stasiun pengisian bahan bakar umum di Nairobi Barat adalah sebesar 17782 W. Sedangkan kebutuhan listrik di SPBU pada saat pemadaman listrik adalah 56.511 kWh dengan pompa bahan bakar disuplai penuh dengan mesin diesel. Rata-rata pemadaman listrik tercatat pada SPBU terjadi selama 6.2 jam dalam 1 bulan dengan penggunaan bahan bakar sebesar 20 liter. Total harga dari penggunaan mesin diesel termasuk harga bahan bakar, perbaikan peralatan dan pembelian mesin diesel adalah sebesar 920.000,00 KSH atau setara dengan Rp. 120.087.247,5. Komponen pada sistem panel surya berupa baterai, *inverter*, panel surya dan controller. Komponen baterai berkapasitas 5886.56 AH dengan jumlah baterai sebanyak 30 baterai 12 V 200 AH. Kapasitas panel surya sebesar 11080.6 W dengan kapasitas satuan panel adalah 280 W berjumlah 40 panel. Kapasitas *inverter* sebesar 15000 W. Total harga sistem panel surya keseluruhan adalah sebesar 2.987.322,80 KSH atau sama dengan Rp 389.934.100,53. Penelitian ini menunjukkan bahwa investasi awal sistem pembangkit energi terbarukan (khususnya energi surya) lebih besar dibandingkan energi fosil. Tetapi biaya operasional dan perawatan mesin diesel dapat dihemat setiap tahun ketika sistem panel surya terpasang [4].

Pada penelitian lainnya yang berjudul rancangan sistem fotovoltaiik tidak terhubung ke jaringan studi kasus kampus fakultas teknik Wudil, negara Kano. Dalam penelitian ini, sistem tidak terhubung ke jaringan (*off-grid*) menjadi pilihan yang cocok untuk diadopsi dalam pembangkitan tenaga listrik. Kebutuhan listrik di kampus fakultas teknik Wudil sebesar 48.787 kWh/hari. Berdasarkan perhitungan komponen peralatan dalam rancangan tersebut, terdapat 72 modul panel surya, 20 baterai, sebuah regulator tegangan dan *inverter* yang tersedia untuk



mensuplai energi listrik di kampus tersebut. Biaya yang dihitung dalam pembangunan sistem sebesar 2.124.972 Naira atau sebesar Rp. 90.300.869,32. Biaya tersebut relatif mahal jika dibandingkan dengan generator diesel yang digunakan di kampus tersebut. Periode pengembalian (*payback period*) dari sistem berkisar pada 2.8 tahun, dimana hal ini lebih cepat dibandingkan umur sistem fotovoltaik yang dipilih dapat beroperasi selama 30 tahun [5].

Penelitian yang berjudul rancangan dan analisa ekonomi dari sistem panel surya terhubung ke jaringan untuk kampus teknik di Karela, menunjukkan desain sistem panel surya dan menganalisa aspek ekonomi dari IRR (*internal rate of return*) dan periode pengembalian modal. Radiasi matahari harian rata-rata di Karela sebesar 4 sampai 6.6 kWh/m², dengan radiasi maksimum pada bulan Maret sampai April dan radiasi minimum pada Desember sampai Januari. Sistem terhubung ke jaringan (*on-grid*) pada sistem panel surya ini tidak menggunakan baterai untuk sistem cadangan energi listriknya. Sistem panel surya terhubung ke jaringan memerlukan *solar grid inverter*, dengan kapasitas dalam jarak antara 95%-110% dari kapasitas array panel surya, tercatat pada penelitian ini ukuran *inverter* sebesar 40 kW. Untuk bangunan dengan sistem panel surya yang terhubung ke jaringan, memerlukan pengukur jaringan (*net meter*) tipe dua arah, dimana sistem tersebut dapat mengimpor kWh ataupun mengeksport kWh secara terpisah. Analisa biaya berdasarkan perhitungan IRR dan *payback period*. Pada penelitian ini dengan sistem 40 kWp kebutuhan energi, dapat melakukan penghematan tahunan sebesar 2,52,352 Rupees. Dengan periode pengembalian modal pada tahun ke 12 tanpa subsidi investasi dan tahun ke 7 dengan subsidi investasi, sehingga pada penelitian ini disimpulkan bahwa proyek ini layak untuk kampus Karela [6].

Kajian mengenai analisis teknik dan ekonomi pada pembangkit listrik tenaga surya untuk industri garmen di kota Jaipur-India, menunjukkan bahwa permintaan energi pada tahun 2011 telah tercatat sebesar 2.21 MW sehingga merancang pembangkit listrik tenaga surya dengan kapasitas 2.5 MW untuk kebutuhan industri garmen. Kajian perancangan dilakukan dengan membandingkan nilai ekonomis antara *on-site* dengan sistem *rooftop* dan *off-site* dengan terpasang diatas tanah tanpa baterai dan menyalurkan energi listrik ke jaringan. Analisa teknik menghasilkan jumlah array panel surya adalah 1390 array dan energi listrik yang dihasilkan terhitung sebesar 27,481 kWh/hari dengan lahan tanah yang dibutuhkan seluas 13.14 acres. Analisa ekonomi menunjukkan pada PLTS *on-site* menghasilkan IRR (*internal rate of return*)



sebesar 11.88%, NPV (*net present value*) sebesar INR 119.52 juta, dan periode pengembalian pada 7.73 tahun. Sedangkan pada PLTS *off-site* menghasilkan IRR (*internal rate of return*) sebesar 15.10%, NPV (*net present value*) sebesar INR 249.78 juta, periode pengembalian pada 6.29 tahun [7].

Pada kajian perancangan pembangkit listrik tenaga surya 30 kWp *on-grid* di kampus Universitas Maritim Raja Ali Haji (UMRAH) menggunakan *software* PV*SOL, bertujuan untuk mendapatkan gambaran kinerja sistem PLTS selama kurun waktu satu tahun dengan cara menganalisis hasil simulasi. Jumlah modul surya yang disimulasikan sebanyak 135 unit dengan 3 *inverter*. Data radiasi matahari di Pulau Dompok Kota Tanjung Pinang Kepulauan Riau berasal dari *database software* PV*SOL dengan jumlah radiasi sebesar 1.502,8 kWh/m²/tahun. Berdasarkan data tersebut, hasil perancangan PLTS dikampus UMRAH menunjukkan produksi energi listrik yang dapat dibangkitkan mencapai 29.607,5 kWh/tahun. Produksi energi listrik tertinggi terjadi pada bulan maret berjumlah 2.801,6 kWh. Berdasarkan hasil simulasi menggunakan *software* PV*SOL tersebut, didapatkan keuntungan sistem PLTS dikampus UMRAH selama 1 tahun sebesar 25.106 kWh yang bisa disuplai ke *grid* atau jaringan [8].

Pada penelitian yang berjudul simulasi teknik-ekonomi dan optimasi dari sistem panel surya perumahan terhubung ke jaringan (*grid connected*) untuk iklim *Queensland, Australia*, menargetkan untuk meneliti aspek ekonomi dan aspek teknik dari sistem panel surya diperumahan berdasarkan iklim cuaca *Queensland*, dengan mengoptimalkan ukuran *array* panel surya serta sudut kemiringan panel surya. Menggunakan radiasi global sebagai data energi matahari, harga peralatan panel surya, baterai, *inverter*, biaya tarif listrik dan biaya penjualan listrik sebagai input aspek ekonomi. Penelitian ini menggunakan simulasi *software* HOMER, dengan lokasi penelitian berada diseluruh kota di *Queensland*, yaitu: *Brisbane, Bundaberg, Cairns, Gladstone, Gold Coast, Mackay, Maryborough, Rockhamton, Sunshine Coast, Toowoomba, Townsville*, dengan beban listrik perumahan perhari sebesar 23 kWh. Pada aspek ekonomi, dengan skenario harga tinggi dan skenario harga rendah, menunjukkan sistem panel surya 6 kW secara umum dapat mengurangi lebih dari setengah biaya listrik untuk perumahan diseluruh kota. Sistem dapat membangkitkan listrik sebesar 54-61% dari permintaan energi listrik perumahan dan mensuplai 5552-6810 kWh listrik ke jaringan per tahun. [9]



Kajian analisa kelayakan dari pilihan suplai energi terbarukan untuk hotel besar yang terhubung ke jaringan, menyajikan sebuah analisa teknik dan keuangan untuk penyediaan listrik dari sistem jaringan saja, energi terbarukan saja atau sistem hibrida energi terbarukan dan jaringan untuk hotel skala besar (lebih dari 100 kamar tidur). Kriteria penilaian terdiri dari *net present cost (NPC)*, *renewable fraction (RF)* dan *payback time*. *Software* HOMER digunakan sebagai alat penilaian dengan dilakukan pemodelan input data beban perjam dari hotel yang terletak di *Queensland, Australia*. Optimasi pemodelan dengan *software* menunjukkan berdasarkan harga tahun 2004, NPC dari konfigurasi sistem hybrid sebanding dengan konfigurasi sistem jaringan saja, menghasilkan 73% RF, 14 tahun pengembalian dan mengurangi 65% gas emisi. Dalam harga listrik sekarang, hampir 4 kali lipat dari harga tahun 2004, konfigurasi sistem hybrid lebih ekonomis selama lebih dari 20 tahun dibandingkan dengan konfigurasi jaringan saja, dengan NPC lebih rendah 50% dan tahun pengembalian pada 4.5 tahun. Analisa tersebut menunjukkan bahwa energi terbarukan secara teknik dan ekonomi layak sebagai penambah produksi listrik dengan terhubung ke jaringan untuk menyalurkan kebutuhan listrik pada hotel skala besar. [10]

Berdasarkan penelitian terkait diatas, penulis akan melakukan penelitian mengenai perancangan pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) pada stasiun pengisian bahan bakar umum (SPBU). Perancangan ini dimulai dengan melakukan perhitungan kebutuhan harian beban listrik di SPBU. Kemudian melakukan perhitungan pada aspek teknik yang meliputi perhitungan kapasitas dan menentukan spesifikasi komponen peralatan pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) seperti kapasitas panel surya dan kapasitas *inverter*. Setelah kapasitas sistem dan spesifikasi masing-masing peralatan diketahui, maka selanjutnya melakukan perhitungan aspek ekonomi terkait didalamnya menghitung biaya keseluruhan sistem, dan mengetahui tahun pengembalian modal investasi. Indikator aspek ekonomi yang dikaji meliputi LCCA (*Life Cycle Cost Analysis*), NPV (*Net Present Value*) dan PP (*Payback Period*). Dalam penelitian ini, perancangan PLTS menggunakan sistem *grid-connected* tanpa baterai. Perancangan PLTS ini akan dibuat gambar teknik menggunakan *software* AutoCAD dan disimulasikan menggunakan *software* PVSyst dan RETScreen untuk mendapatkan hasil yang lebih detail. Perbedaan penelitian ini dengan penelitian yang sudah ada yaitu perancangan PLTS ini menggunakan *software* yang dapat menghasilkan *output* yang lebih akurat dan juga penelitian ini membuat



gambar teknik perancangan pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) pada bangunan SPBU 14.282.661 Arifin Ahmad.

2.2. Landasan Teori

2.2.1. Energi Matahari

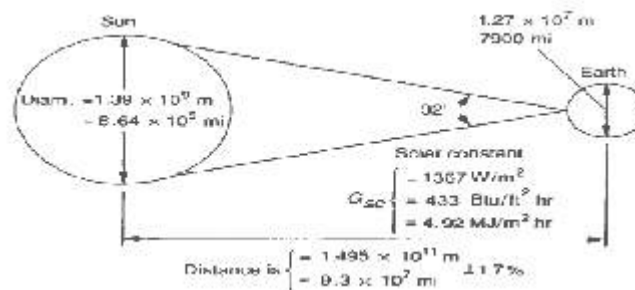
Matahari merupakan materi yang tersusun dari gas yang sangat panas dengan diameter $1,39 \times 10^9$ m, dan jarak $1,5 \times 10^{11}$ m dari bumi. Matahari memiliki suhu permukaan efektif 5777 K. Suhu di daerah inti matahari berkisar 8×10^6 sampai 40×10^6 dan densitasnya diperkirakan 100 kali lebih besar dari air. Matahari pada dasarnya adalah sebuah reaktor fusi kontinyu dengan gas penyusunnya tetap dipertahankan oleh gaya gravitasi. Energi yang dipancarkan oleh matahari berasal dari reaksi fusi. Energi diproduksi pada bagian dalam matahari dan terkirim ke permukaan dan kemudian teradiasi ke luar angkasa.

Matahari merupakan sumber utama bagi kehidupan di bumi, sumber energi yang dihasilkan oleh matahari berupa energi panas dan energi cahaya yang dipergunakan makhluk hidup untuk memenuhi kebutuhan hidupnya. Bumi menerima 175×10^5 Watt radiasi surya pada atmosfer terluar. Kurang lebih 30 % dari total radiasi terefleksi kembali ke ruang angkasa, dimana 70% sisanya terserap oleh awan, lautan, dan juga daratan.

2.2.2. Radiasi yang Dipancarkan Matahari

Jarak eksentrisitas orbit bumi sedemikian rupa sehingga jarak antara matahari dan bumi bervariasi sebesar 1,7%. Dari hasil pengukuran astronomi didapat jarak rata-rata bumi matahari adalah $1,495 \times 10^{11}$ m dengan sudut kecenderungan matahari 32° . Konstanta matahari (G_{sc}) adalah energi dari matahari per unit waktu yang diterima pada satu unit luasan permukaan yang tegak lurus arah radiasi matahari pada jarak rata-rata matahari - bumi di luar atmosfer.

World Radiation Center (WRC) menetapkan nilai konstanta matahari (G_{sc}) sebesar 1367 W/m^2 dengan ketidakpastian sebesar 1% . Gambar hubungan matahari dan bumi dapat dilihat pada Gambar 2.1:



Gambar 2.1 Hubungan Matahari dan Bumi [11]

Intensitas radiasi matahari yang sampai ke bumi bergantung pada jarak antara matahari dan bumi yang dalam satu tahun bervariasi antara $1,47 \times 10^8$ Km dan $1,52 \times 10^8$ Km. Akibatnya radiasi matahari berfluktuasi antara 1325 W/m^2 dan 1412 W/m^2 . Nilai rata-rata yang dirujuk sebagai konstanta surya adalah 1367 W/m^2 . Nilai radiasi tersebut tidak mencapai permukaan bumi. Atmosfer bumi mengurangi insolasi melalui refleksi, penyerapan (oleh ozon, uap air, oksigen dan karbon dioksida) dan penyebaran (yang disebabkan oleh molekul udara, partikel debu atau polusi). Pada cuaca cerah pada siang hari, radiasi bisa mencapai 1000 W/m^2 di permukaan bumi [12].

2.2.3 Radiasi Matahari Yang Diterima oleh Bumi

Radiasi matahari yang melewati atmosfer, sebagian diserap dan sebagian menyebar. Radiasi matahari yang diterima oleh permukaan bumi dibagi menjadi tiga jenis, yaitu [13]:

- Radiasi langsung (direct radiation atau beam radiation)

Radiasi langsung adalah radiasi yang diterima dari matahari dalam suatu garis lurus, tanpa penyebaran oleh atmosfer. Sinarinya sejajar satu sama lain; Oleh karena itu radiasi langsung dapat menciptakan bayangan dan dapat dikonsentrasikan oleh cermin.

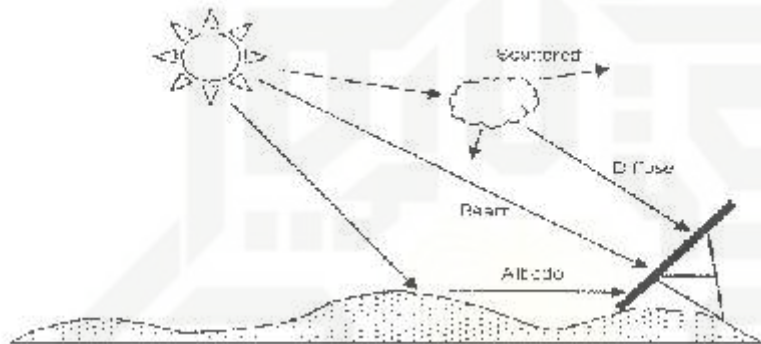
- Radiasi tersebar (diffuse radiation)

Radiasi menyebar terdiri dari cahaya yang tersebar oleh atmosfer (udara, awan, aerosol). Difusi adalah fenomena yang menyebarkan cahaya matahari menuju ke segala arah. Di langit, sinar matahari disebarkan oleh molekul udara, butiran uap air (awan) dan debu. Tingkat penyebaran sinar sangat bergantung pada kondisi cuaca.

c. Radiasi pantulan

Radiasi pantulan adalah radiasi yang dipantulkan oleh tanah, yang bergantung pada keadaan lingkungan sekitar. Contohnya yaitu salju, yang memantulkan radiasi dengan jumlah yang besar. Sedangkan aspal nyaris tidak memantulkan radiasi.

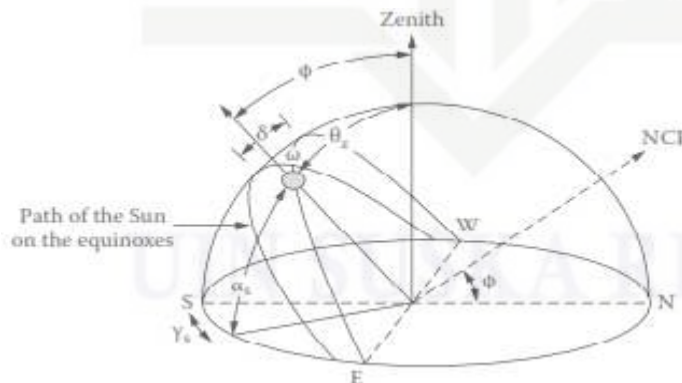
Radiasi total matahari pada permukaan bumi adalah jumlah dari radiasi langsung, radiasi tersebar, dan radiasi pantulan. Gambar total radiasi matahari pada permukaan bumi dapat dilihat pada Gambar 2.2 :



Gambar 2.2 Total Radiasi pada Permukaan Bumi [13]

2.2.4. Posisi Matahari Terhadap Bidang Horizontal

Untuk menggambarkan posisi matahari terhadap permukaan horizontal di bumi setiap saat, sudut berdasarkan koordinat bumi perlu dipahami. Sudut tersebut ditunjukkan pada Gambar 2.3 :



Gambar 2.3 Posisi Matahari Dijelaskan oleh Sudut – Sudut Matahari [14]



Sudut ketinggian matahari (α), adalah ketinggian matahari diukur dalam derajat dari bidang datar bumi terhadap proyeksi sinar radiasi untuk posisi matahari. Ketika matahari berada di kaki langit, $\alpha = 0^\circ$ dan ketika berada tepat di atas kepala, $\alpha = 90^\circ$. Di sebagian besar lintang, matahari tidak akan pernah berada langsung di atas kepala.

Sudut *zenith* (z), adalah sudut antara garis vertikal bidang normal dan garis datang sinar matahari.

Azimuth matahari (ϕ) adalah sudut pada bidang horizontal antara proyeksi sinar radiasi terhadap arah acuan utara atau selatan. *Azimuth* bernilai positif menunjukkan matahari berada di sebelah barat dari arah acuan selatan dan negatif menunjukkan ketika matahari berada timur dari selatan.

Sudut jam (ω) adalah jarak sudut antara posisi matahari pada waktu tertentu terhadap posisi matahari tertinggi pada hari tersebut yang mana berada pada tengah hari jam matahari. Karena bumi berotasi sekali dalam setiap 24 jam, sudut jam berubah sebesar 15° per jam dan bergerak sebesar 360° dalam satu hari. Sudut jam bernilai nol pada tengah hari matahari, bernilai negatif sebelum melewati garis meridian lokal, dan positif setelah melintasi. Lamanya hari bervariasi untuk semua lintang sepanjang tahun sehingga ketinggian matahari (α) juga berubah setiap jam dan setiap hari. Ketika radiasi matahari pada kolektor matahari horizontal dihitung, dua sudut baru harus didefinisikan. Sudut kemiringan permukaan (β) menunjukkan bagaimana kolektor miring terhadap bidang horizontal dimana pada kolektor horizontal sudut kemiringan (β) bernilai 0° . Sudut lain yang terkait untuk perhitungan adalah sudut permukaan azimuth (ϕ), yang menunjukkan seberapa jauh kolektor matahari menyimpang dari sumbu utara atau selatan. Sudut ini diukur diantara proyeksi horizontal permukaan normal terhadap arah acuan utara atau selatan, dengan nilai 0 jika mengarah ke selatan dan bernilai negatif ke arah timur dari sumbu tersebut.

2.2.5. Posisi Matahari Terhadap Permukaan Bidang Miring

Pemanenan energi matahari dalam jumlah maksimum dapat dicapai jika sinar matahari tegak lurus terhadap arah kolektor (yaitu, sejajar dengan permukaan normal kolektor).



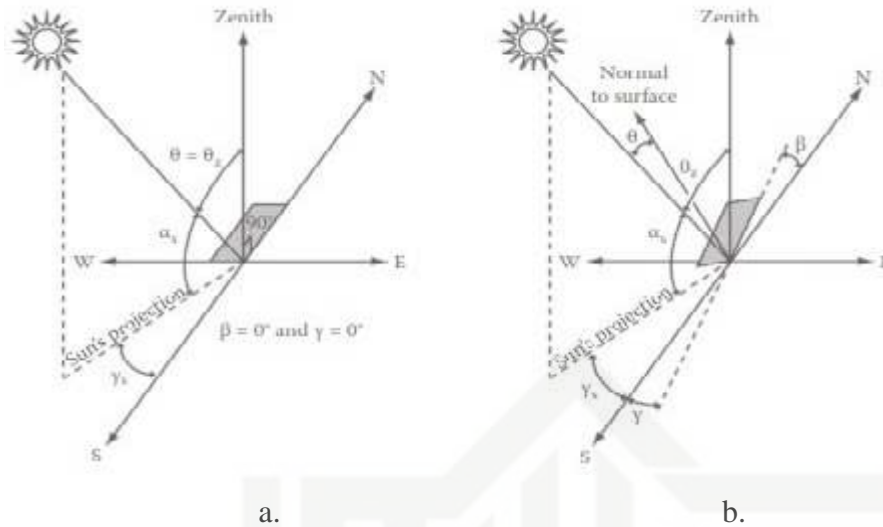
Hal ini hanya dapat dicapai ketika sistem pelacakan surya digunakan untuk memodifikasi sudut kemiringan () atau *azimuth* permukaan () atau kedua sudut selama operasi kolektor. Namun, sistem ini lebih mahal daripada kolektor yang tetap karena sistem bergerakanya [14].

Kolektor dengan sudut kemiringan () tetap adalah kolektor paling praktis dan paling banyak dipasang di seluruh dunia. Agar kolektor dengan sudut kemiringan tetap dapat menangkap sebagian besar radiasi matahari tahunan yang masuk, permukaan harus selalu miring menghadap khatulistiwa. Ketinggian matahari maksimum untuk setiap hari terjadi pada saat tengah hari ketika sudut *azimuth* matahari bernilai nol (yaitu, searah dengan arah acuan utara atau selatan).

Untuk periode ketika ketinggian matahari maksimum matahari pada posisi rendah, akan lebih aman untuk memasang kolektor dengan kemiringan yang lebih besar untuk meminimalkan sudut antara sinar matahari dan permukaan normal kolektor. Untuk periode ketika matahari berada di jalur yang lebih tinggi di langit, sudut kemiringan harus kecil. Untuk pemanenan yang lebih maksimal beberapa sudut kemiringan dapat digunakan untuk beberapa kondisi dalam satu tahun.

Sudut datang matahari () adalah sudut antara sinar radiasi matahari di permukaan terhadap garis bayangan normal permukaan kolektor. Pada $= 0^\circ$, sinar matahari tegak lurus terhadap arah permukaan kolektor dan ketika $= 90^\circ$, sinar matahari sejajar dengan permukaan kolektor.

Pemanenan maksimum untuk setiap intensitas matahari dicapai bila sudut datang adalah nol karena permukaan memantulkan lebih banyak cahaya ketika sinar cahaya yang datang tidak tegak lurus terhadap permukaan kolektor. Hubungan geometris antara sudut matahari terhadap permukaan ditunjukkan oleh Gambar 2.4a dan Gambar 2.4b :



Gambar 2.4 Hubungan geometris antara sudut matahari terhadap (a) permukaan horizontal. (b) permukaan dengan sudut kemiringan [14]

Dari Gambar 2.4a sudut sinar datang matahari (θ) bernilai sama dengan sudut *zenith* (z) dikarenakan arah normal permukaan horizontal tegak lurus dengan arah vertikal *zenith* permukaan horizontal. Sementara pada Gambar 2.4b, sudut sinar datang matahari (θ) berubah dikarenakan arah normal permukaan bidang miring tidak sama dengan arah vertikal *zenith* permukaan horizontal.

2.3. Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)

Pembangkit listrik berfungsi menghasilkan energi listrik melalui proses generator listrik. Energi listrik yang dihasilkan merupakan proses konversi dari sumber energi primer yang dapat berupa energi baru terbarukan (EBT) atau bahan bakar. Komponen utama dalam sistem ini adalah turbin yang berfungsi mengkonversi sumber energi primer menjadi energi mekanik, kemudian melalui alternator dapat dihasilkan energi listrik. Jenis pusat pembangkit ditentukan berdasarkan jenis sumber energi primer yang digunakan untuk menggerakkan generator maupun turbinnya, seperti contohnya PLTA (Pembangkit Listrik Tenaga Air) adalah pembangkit listrik yang bersumber energi air. Pemilihan sumber pusat pembangkit listrik sebaiknya memperhatikan beberapa aspek seperti aspek biaya modal, aspek pengoperasian, aspek efisiensi dan aspek sosial.

Oleh karena itu, setiap jenis pembangkit dinamakan berdasarkan jenis bahan baku energi yang digunakan baik bahan bakar fosil maupun energi baru terbarukan. Pusat pembangkit listrik



dapat dibedakan menjadi pusat pembangkit listrik konvensional dan non konvensional. Pusat pembangkit listrik konvensional contohnya seperti PLTD (diesel), PLTU (uap), PLTA (air), PLTGU (gas dan uap), dan lainnya. Untuk pembangkit listrik nonkonvensional berasal dari bahan baku EBT seperti biomassa, solar, sampah, angin dan gelombang laut.

Menurut bahasa, kata fotovoltaik berasal dari bahasa Yunani *photos* yang berarti cahaya dan *volta* yang merupakan nama ahli fisika dari Italia yang menemukan tegangan listrik. Secara sederhana dapat diartikan sebagai listrik dari cahaya. Fotovoltaik merupakan sebuah proses untuk mengubah energi cahaya menjadi energi listrik. Proses ini bisa dikatakan kebalikan dari penciptaan laser. Efek fotovoltaik pertama kali berhasil diidentifikasi oleh seorang ahli fisika berkebangsaan Prancis Alexandre Edmond Becquerel pada tahun 1839. Baru padatahun 1876, William Grylls Adams bersama muridnya, Richard Evans Day menemukan bahwa material padat selenium dapat menghasilkan listrik ketika terkena paparan sinar. Dari percobaan tersebut, meskipun bisa dibilang gagal karena selenium belum mampu mengonversi listrik dalam jumlah yang diinginkan, namun hal itu mampu membuktikan bahwa listrik bisa dihasilkan dari material padat tanpa harus ada pemanasan ataupun bagian yang bergerak. Tahun 1883, Charles Fritz mencoba melakukan penelitian dengan melapisi semikonduktor selenium dengan lapisan emas yang sangat tipis. Fotovoltaik yang dibuatnya menghasilkan efisiensi kurang dari 1%.

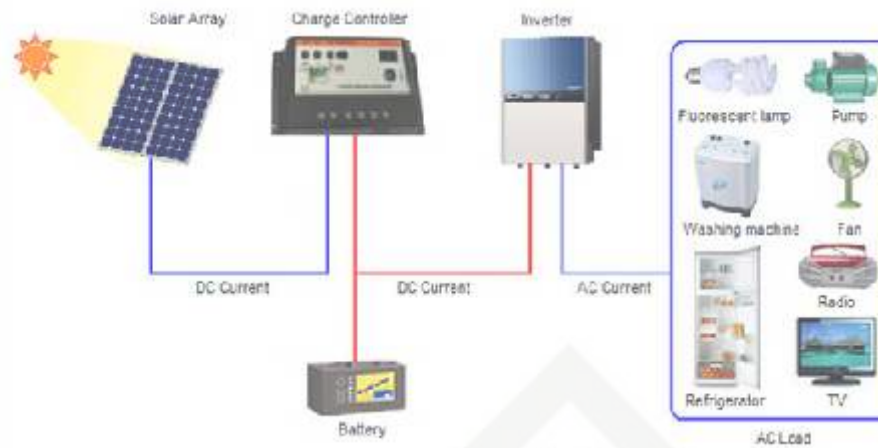
Perkembangan berikutnya yang berhubungan dengan ini adalah penemuan Albert Einstein tentang efek fotolistrik pada tahun 1904. Tahun 1927, fotovoltaik dengan tipe yang baru dirancang menggunakan tembaga dan semikonduktor copper oxide. Namun kombinasi ini jugahnya bisa menghasilkan efisiensi kurang dari 1%. Pada tahun 1941, seorang peneliti bernama Russel Ohl berhasil mengembangkan teknologi sel surya dan dikenal sebagai orang pertama yang membuat paten peranti solar cell sel surya modern. Bahan yang digunakan adalah silikon dan mampu menghasilkan efisiensi berkisar 4%. Barulah kemudian ditahun 1954, Bell Laboratories berhasil mengembangkannya hingga mencapai efisiensi 6% dan akhirnya 11%. Pada umumnya pembangkit listrik tenaga surya terdiri atas komponen panel surya, *controller*, baterai dan *inverter* seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.5 berikut ini:

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

- Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
- Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

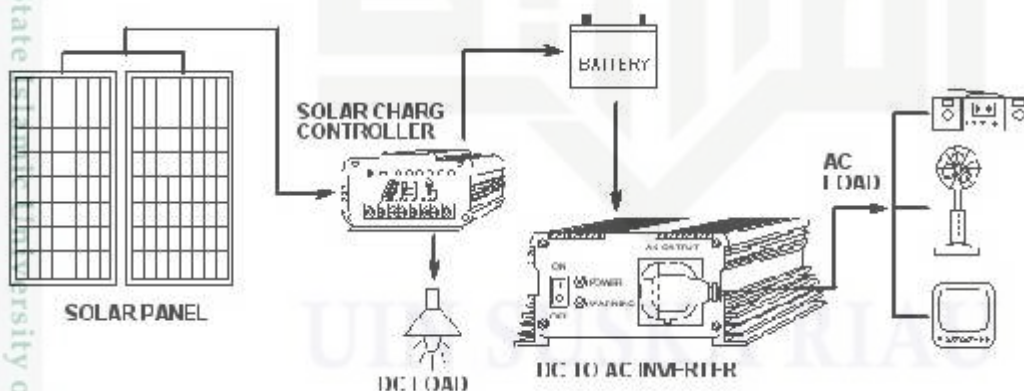


Gambar 2.5. Skema Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) [15]

a. Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) *Off-grid*

Pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) *off-grid* disebut juga *Stand Alone PV system* atau Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya Terpusat yang merupakan sistem pembangkit listrik alternatif untuk daerah-daerah terpencil/pedesaan yang tidak terjangkau oleh jaringan PLN. Sistem PLTS terpusat hanya mengandalkan energi matahari sebagai satu-satunya sumber energi utama dengan menggunakan rangkaian modul sel surya untuk menghasilkan energi listrik sesuai dengan kebutuhan.

Secara umum, konfigurasi pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) *off-grid* ditunjukkan pada gambar 2.6 berikut ini :



Gambar 2.6. Konfigurasi Pembangkit Listrik Tenaga Surya *off-grid* [16]

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah,

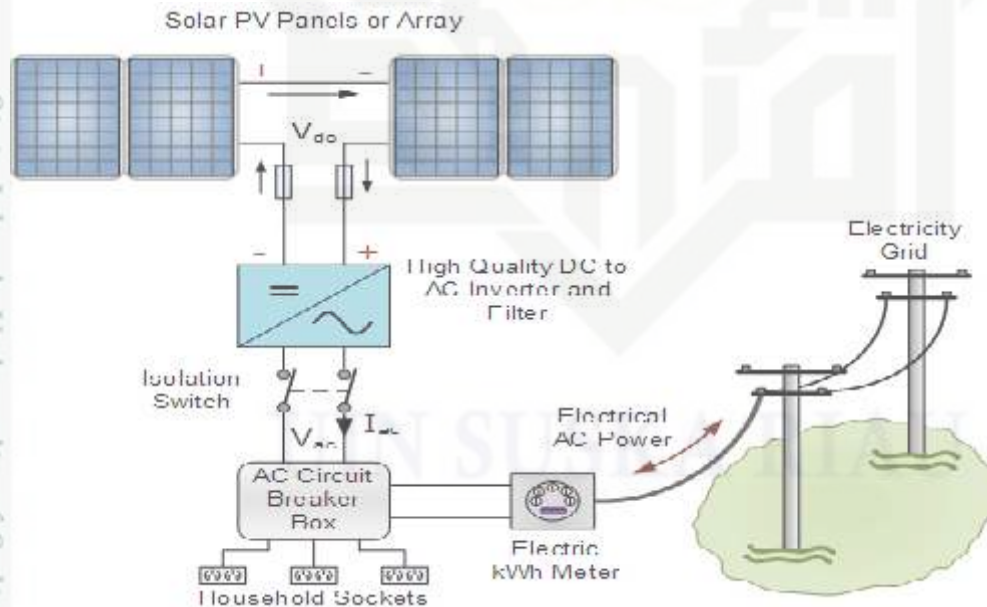
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

b. Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) *On-grid*

Pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) *on-grid* atau terhubung ke jaringan merupakan solusi *green energy* bagi penduduk perkotaan baik perumahan ataupun perkantoran. Sistem pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) ini menggunakan Modul Surya (*Photovoltaic Module*) untuk menghasilkan listrik yang ramah lingkungan dan bebas emisi. Dengan adanya sistem pembangkit listrik tenaga surya (PLTS ini) akan mengurangi tagihan listrik rumah tangga, dan memberikan nilai tambah pada pemiliknya.

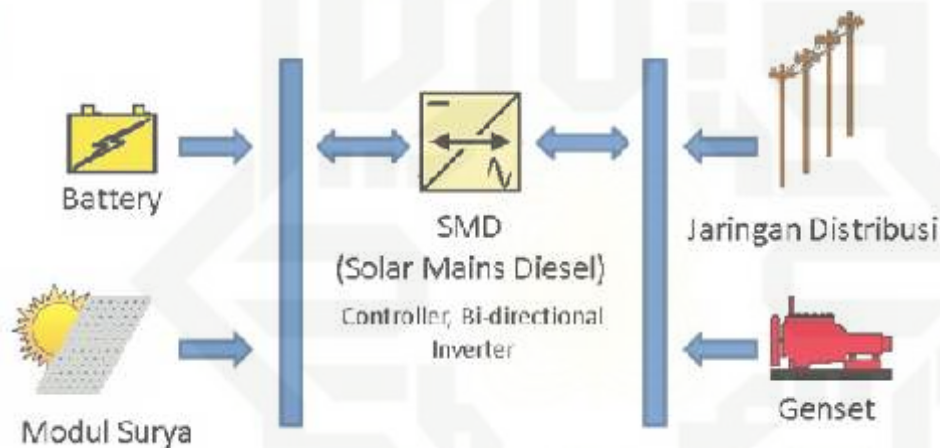
Pada siang hari, modul surya yang terpasang pada atap akan mengkonversi sinar matahari menjadi Energi listrik Arus Searah (DC). Selanjutnya sebuah komponen yang disebut *Grid-inverter* merubah listrik arus searah (DC) dari PV menjadi listrik arus bolak-balik (AC) yang kemudian dapat digunakan untuk mensuplai berbagai peralatan rumah tangga seperti Lampu, TV, Kulkas, Mesin Cuci, dan lain-lain. Jadi pada siang hari, kebutuhan energi listrik berbagai peralatan disuplai langsung oleh modul surya. Jika pada kondisi ini terdapat kelebihan energi dari modul surya maka kelebihan energi ini dapat dijual ke jaringan PLN. Pada malam hari atau jika kondisi cuaca mendung maka peralatan akan dikirim oleh jaringan PLN. Hal ini dimungkinkan karena sistem ini tetap terkoneksi dengan jaringan PLN. Konfigurasi pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) *on-grid* ditunjukkan pada gambar 2.7 berikut ini :



Gambar 2.7. Konfigurasi Pembangkit Listrik Tenaga Surya *on-grid* [16]

c. Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) *Hybrid*

Pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) *hybrid* system adalah penggunaan 2 sistem atau lebih pembangkit listrik dengan sumber energi yang berbeda. Umumnya sistem pembangkit yang banyak digunakan untuk *hybrid* adalah genset, PLTS, mikrohydro, tenaga angin. Sistem ini merupakan salah satu alternatif sistem pembangkit yang tepat diaplikasikan pada daerah-daerah yang sulit dijangkau oleh sistem pembangkit besar seperti jaringan PLN atau Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD). Sistem *hybrid* ini memanfaatkan *renewable energy* sebagai sumber utama (primer) yang dikombinasikan dengan genset atau lainnya sebagai sumber energi cadangan (sekunder). Konfigurasi pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) *hybrid* ditunjukkan pada gambar 2.8 berikut ini :



Gambar 2.8. Konfigurasi Pembangkit Listrik Tenaga Surya *hybrid* [16]

Adapun komponen-komponen peralatan utama dalam pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) *on-grid* sebagai berikut:

2.3.1. Panel Surya

Photovoltaic adalah alat yang berfungsi untuk mengubah atau mengkonversi energi matahari menjadi energi listrik. Panel surya terbuat dari bahan semikonduktor. Bahan yang sering dipakai untuk pembuatan panel surya adalah silikon.

Jumlah energi yang dihasilkan oleh panel surya bergantung kepada energi matahari yang tersedia, yang pada khususnya bergantung pada arah modul surya terhadap matahari. Ketika panel surya mendapat masukan berupa intensitas cahaya matahari maka akan dapat menghasilkan arus. Besar arus yang dihasilkan oleh panel surya berbanding lurus dengan besar



intensitas cahaya matahari yang masuk ke dalam sel surya. Besar intensitas cahaya matahari berubah sesuai dengan pergeseran posisi matahari. Dalam kenyataannya, panel surya yang selama ini digunakan memiliki banyak variasi meliputi daya maksimum, tegangan, dan arus yang mampu dihasilkan oleh modul saat operasi. Tiappanel surya memiliki paramater yang berbeda-beda. Perbedaan utama terlihat dari tegangan rangkaian terbuka (V_{oc}) dan arus hubung singkat (I_{sc}).

Panel surya terbuat dari bahan semi konduktor yang tersusun dari lapisan tipe n dan tipe p. Lapisan tipe p dan lapisan tipe n yang bertemu akan menciptakan P – N *junction*. Prinsip kerja panel surya dapat dijelaskan sebagai berikut :

Semikonduktor

Elektron pada pitater luar dari sebuah atom menentukan bagaimana sebuah atom akan bereaksi atau bergabung dengan atom tetangga, pita terluar disebut pita valensi. Beberapa electron pada pita valensi dapat melompat kepitayang lebih tinggi danjauh terpisah dari inti.Elektron tersebut bertanggung jawab untuk konduksi panas dan listrik, dan pita terjauh ini disebut pita konduksi. Perbedaan energidari sebuah electron pada pita valensi dan sub kulit terdalam pita konduksi disebut celah pita (*band gap*).

Silikon memiliki empat elektron pada pita valensi. Atom silikon murni membentuk struktur yang stabil dan masing-masing atom berbagi dua elektron dengan setiap atom disekitarnya. Jika fosfor yang memiliki lima elektron valensi (satu lebih banyak dari Si), digunakan sebagai campuran dalam silikon maka material yang dibentuk akan memiliki kelebihan elektron meskipun netral. Bahan yang didoping seperti ini disebut silikon tipe n. Jika silikon didoping (dicampur) dengan boron, yang memiliki tiga elektron valensi (satu lebih sedikit dari Si), maka ada lubang positif (hilang elektron) dalam strukturnya, meskipun material yang didoping adalah netral. Materil tersebut disebut silikon tipe-p. Dengan demikian, semikonduktor tipe n dan p memudahkan elektron dan lubang untuk bergerak di semikonduktor. Gambar 2.9 menunjukkan konduksi ekstrinsik atom silikon sebagai berikut:

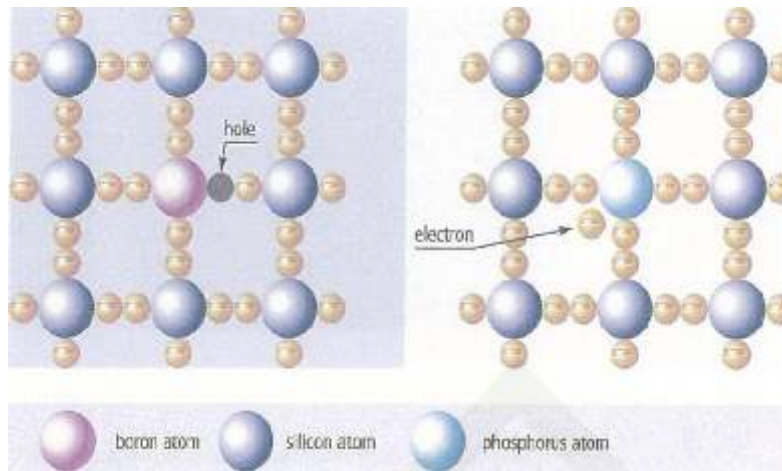
Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah,

b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

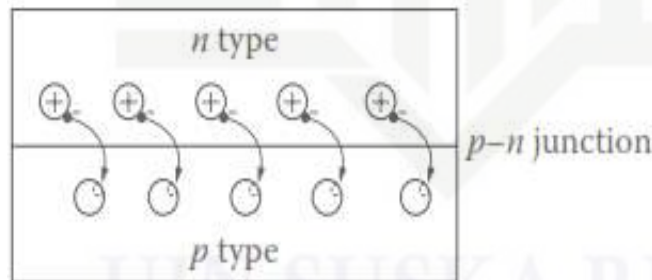
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.



Gambar 2.9. Konduksi ekstrinsik di dalam silikon n- dan p- [13]

P – N Junction

Bahan tipe n memiliki beberapa atom pengotor dengan elektron lebih banyak dari atom semikonduktor lainnya. Jika elektron berlebih dilepas, atom pengotor akan lebih sesuai secara merata pada struktur yang dibentuk oleh atom semikonduktor utama namun atom yang ditinggalkan akan bermuatan positif. Di sisi lain, bahan tipe p memiliki beberapa atom pengotor dengan elektron lebih sedikit dari sisa atom semikonduktor. Oleh karena itu, atom-atom ini memiliki lubang yang bisa menampung elektron berlebih meskipun atom bermuatan netral. Jika penambahan elektron dilakukan untuk mengisi lubang, atom pengotor akan lebih sesuai secara merata pada struktur yang dibentuk oleh atom semikonduktor utama namun atom tersebut akan bermuatan negatif. Hubungan lapisan p dan lapisan n ditunjukkan oleh Gambar 2.10 :



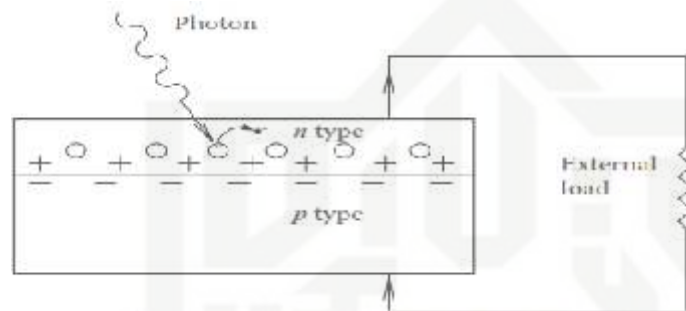
Gambar 2.10. P – N junction [17]

Dari Gambar 2.10. dapat dilihat ketika kedua bahan bergabung, elektron berlebih melompat dari lapisan n untuk mengisi lubang di lapisan p. Oleh karena itu di dekat sambungan materi memiliki muatan positif pada sisi n dan muatan negatif pada sisi p. Muatan negatif di sisi

p membatasi pergerakan elektron tambahan dari sisi n ke sisi p, sementara pergerakan elektron tambahan dari sisi p ke sisi n menjadi lebih mudah karena muatan positif pada sambungan ada pada sisi n. Pembatasan ini membuat p-n *junction* berperilaku seperti dioda.

Efek Photovoltaik

Ketika foton dari cahaya diserap oleh electron valensi sebuah atom, energi electron meningkat sesuai dengan dengan jumlah energi dari foton. Perpindahan elektron dikarenakan foton ditunjukkan oleh Gambar 2.11 :



Gambar 2.11. Perpindahan Elektron pada P-N *Junction* [17]

Jika energi foton tersebut sama dengan atau lebih besar dari celah pita semikonduktor, electron akan melompat ke pita konduksi. Namun jika energi foton lebih kecil dari celah pita, electron tidak akan memiliki energi yang cukup untuk melompat ke pita konduksi. Akibatnya kelebihan energi dari electron diubah menjadi energi kinetik oleh elektron, yang mengakibatkan suhu meningkat. Foton hanya dapat membebaskan satu elektron meskipun energi foton jauh lebih tinggi dari celah pita. Ini dari pemanfaatan efek photovoltaik untuk pembangkitan listrik adalah untuk menyalurkan elektron bebas melalui resistansi eksternal sebelum elektron bergabung kembali dengan lubang.

Panel surya memiliki beberapa jenis yang berbeda tergantung dari bahan yang dipakai. Bahan yang dipakai panel surya membedakan kualitas dari panel surya yaitu kualitas tegangan dan arus. Beberapa jenis panel surya antara lain[14] :

- *Crystalline* Silikon

Bahan yang paling utama dalam pembuatan sel surya *Crystalline* adalah silikon. Materi ini tidak dalam bentuk murni, tetapi dalam senyawa kimia dengan oksigen dalam bentuk

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

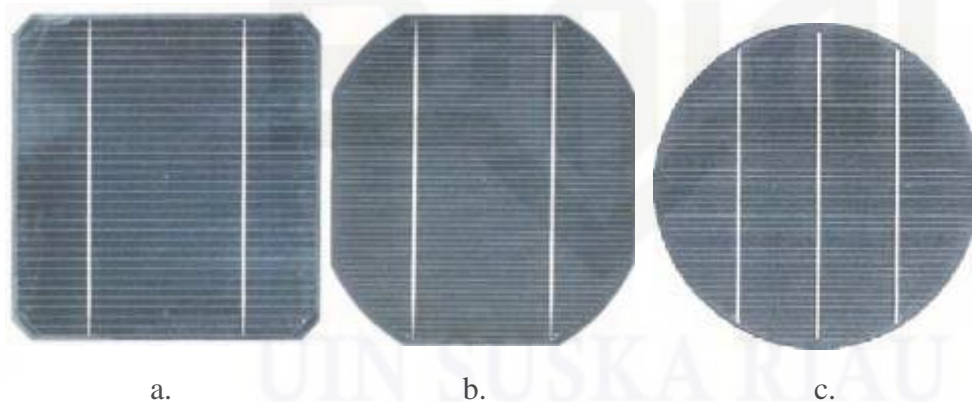
- Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
- Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

kuarsa atau pasir. Oksigen tidak diperlukan maka harus lebih dulu dipisahkan dari silikon dioksida.

- Sel silikon *MonoCrystalline*

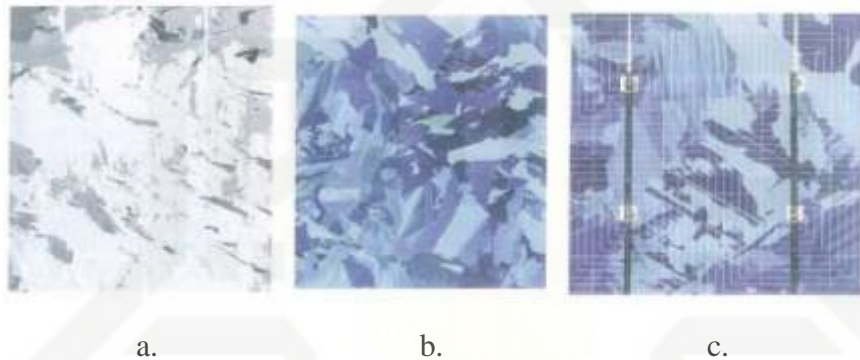
Proses *Czochralski (crucible drawing process)* menjadi patokan dalam produksi silikon kristal tunggal untuk penggunaan peralatan yang berhubungan dengan bumi (*terrestrial*). Pada proses ini, bahan dasar dari *polyCrystalline (polysilicon)* dilelehkan di dalam suatu wadah kuarsa, pada suhu sekitar 1420°C . Sebuah biji kristal dicelupkan ke dalam lelehan silikon tadi dan perlahan-lahan ditarik ke atas keluar dari lelehan. Selama proses ini, kristal akan berubah menjadi *monocrystal* berbentuk silinder dengan diameter mencapai 30 cm. Kristal tunggal silinder ini dipotong untuk membentuk batangan semi bulat atau persegi yang kemudian dipotong lagi dengan menggunakan gergaji kawat menjadi lempeng-lempeng tipis dengan tebal sekitar 0,3 mm. Lapisan berbentuk wafer itu lalu dibersihkan dengan pembasahan secara kimia, dengan pengetsaan dan pembilasan untuk menghilangkan sisa-sisa pemotongan dan bekas pemotongan. Mulai dari bagian mentah (*raw wafers*) kemudian lapisan didoping dengan boron menjadi tipe p sementara tipe n dibuat dengan mendoping fosfor. Gambar bentuk sel silikon *monocrystalline* ditunjukkan oleh Gambar 2.12.a, Gambar 2.12.b, dan Gambar 2.12.c :



Gambar 2.12. Bentuk Sel *MonoCrystalline* (a.) sel *MonoCrystalline* persegi (b.) sel *MonoCrystalline* semi bulat (c.) sel *MonoCrystalline* bulat [13]

- Sel Silikon *Polycrystalline*

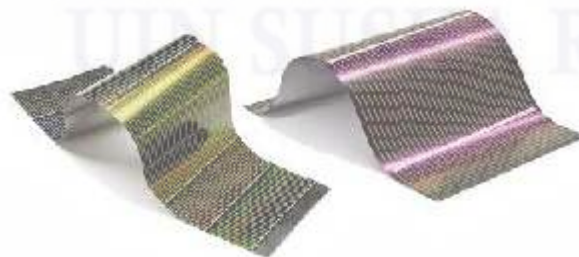
Material silikon mula-mula dilelehkan didalam wadah kuarsa. Pada metode balok tuang (*block cast method*), balok silikon berukuran besar atau *ingot* akan terbentuk. *Ingot* biasanya dipotong-potong menjadi batangan-batangan dengan menggunakan gergaji pita (*band saw*) dan kemudian dipotong lagi menjadi lempengan lempengandengan ketebalan sekitar 0,3 mm dengan menggunakan gergaji kawat. Setelah pembersihan dan penambahan fosfor, lapisan anti pantul digunakan. Bentuk sel *polyCrystalline* ditunjukkan oleh Gambar 2.13.a, Gambar 2.13.b dan Gambar 2.13.c :



Gambar 2.13. Bentuk Sel *PolyCrystalline* (a.) Sel *polyCrystalline* tanpa lapisan anti – reflektif (b.) Sel *polyCrystalline* dengan lapisan anti – reflektif (c.) Sel *polyCrystalline* dengan lapisan anti – reflektif dan garis grid hubung [13]

- Teknologi Sel *Thin – Film*

Jenis sel surya ini diproduksi dengan cara menambahkan satu atau beberapa lapisan material sel surya yang tipis ke dalam lapisan dasar. Sel surya jenis ini sangat tipis karenanya sangat ringan dan fleksibel. Jenis ini dikenal juga dengan nama TFPV (*Thin Film Photovoltaic*). Gambar sel *thin – film* ditunjukkan oleh Gambar 2.14 :





1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

Gambar 2.14. Sel *Thin – Film* [13]

Berdasarkan material penyusunnya, sel surya *thin film* ini digolongkan menjadi[13]:

- *Amofous silicon (a-Si) Solar Cells.*

Sel surya dengan bahan *amofous silicon* ini awalnya banyak diterapkan pada kalkulator dan jam tangan. Namun seiring dengan perkembangan teknologi pembuatannya, penerapannya menjadi semakin luas. Teknik pembuatan dengan cara beberapa lapis amorphous silicon ditumpuk membentuk sel surya.

- *Cadmium Telluride (CdTe) Solar Cells.*

Sel surya jenis ini mengandung bahan Cadmium Telluride yang memiliki efisiensi lebih tinggi dari sel surya amorphous silicon, yaitu sekitar 9% 11%

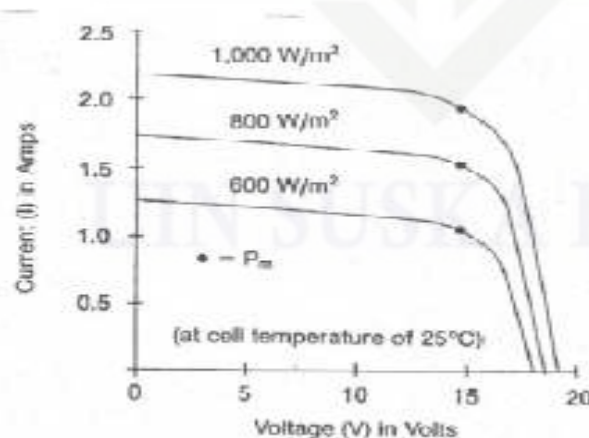
- *Copper Indium Gallium Selenide (CIGS) Solar Cells.*

CIGS sel surya memiliki efisiensi paling tinggi jika dibandingkan dengan a-Si dan CdTe yaitu sekitar 10% - 12%. Selain itu jenis ini tidak mengandung bahan berbahaya Cadmium seperti pada sel surya CdTe.

Pengoperasian maksimum panel surya sangat bergantung pada faktor-faktor sebagai berikut:

1. Temperatur

Sebuah sel surya dapat beroperasi secara maksimum jika temperature sel tetap normal (25°C), kenaikan temperatur lebih tinggi dari temperatur normal pada PV sel akan melemahkan tegangan *open circuit (Voc)*. Setiap kenaikan temperature sel surya 1°C dari 25°C akan berkurang sekitar 0,5% pada total tenaga yang dihasilkan, seperti yang ditunjukkan oleh gambar 2.15:





Gambar 2.15. Pengaruh Suhu Sel Surya terhadap Tegangan [13]

2. Radiasi Matahari (*Insolation*)

Radiasi matahari di bumi dan berbagai lokasi bervariasi sangat tergantung keadaan spectrum sel surya ke bumi. *Insolation* matahari akan banyak berpengaruh pada arus (I) dan berpengaruh sedikit pada tegangan (V), seperti yang ditunjuk pada Gambar 2.15.

3. Kecepatan Angin

Kecepatan tiup angin disekitar lokasi panel surya dapat membantu mendinginkan permukaan temperature kaca –kaca panel surya.

4. Keadaan Atmosfir Bumi

Keadaan atmosfer bumi seperti berawan, mendung, partikel debu udar, asap uap air udara, kabut dan polusi sangat menentukan hasil maksimum arus listrik dari deretan modul surya.

5. Sudut orientasi matahari (*tilt angle*) dan peletakan panel

Agar energi tetap berada pada nilai yang optimal maka permukaan panel surya harus dipertahankan tegak lurus terhadap sinar matahari yang jatuh ke permukaan panel surya, oleh karena itu penentuan *tilt angle* sangat penting untuk mempertahankan energi matahari secara terus-menerus. Ada 5 cara peletakan panel surya yaitu :

- *Fixed Array*

Deretan panel surya diletakan pada struktur penyangga sel surya (rangka tersendiri) atau menyatu ke struktur atap. Pemasangan secara tetap sering dilakukan karena paling mudah dalam pelaksanaan dan biaya lebih sedikit. Sudut kemiringan (*tilt angle*) pada suatu lokasi berdasarkan sudut altitude matahari pada suatu lokasi dalam suatu waktu dapat di cari dengan persamaan:

$$\beta_N = 90^\circ - L \pm \delta \quad (2.1)$$

$$Tilt = 90^\circ - \beta_N \quad (2.2)$$

Dengan : β_N = *Altitude Angle (Degree)*

L = *Latidue Angle Location (Degree)*

δ = *Declination Angle (Degree)*

- *Seasonally Adjusted Tilting*



Deretan modul sel surya dapat dirubah secara manual sesuai waktu yang dikehendaki untuk pengoptimalan *tilt angle*. Lokasi yang terletak pada *middle attitude* dapat mengubah sudut sel surya setiap 3 bulan dan akan meningkatkan produksi energi surya $\pm 5\%$.

- *One Axis Tracking*

Panel modul sel surya dapat mengikuti lintasan pergerakan matahari dari timur ke barat secara otomatis, akan meningkatkan efisiensi $\pm 20\%$ dibandingkan *fixed arrays*.

- *Two Axis Tracking*

Panel modul sel surya dapat mengikuti lintasan pergerakan matahari dari timur ke barat serta orientasi utara-selatan secara otomatis, akan meningkatkan efisiensi $\pm 40\%$ dibandingkan *fixed arrays*.

- *Concentrator Arrays*

Deretan lensa optic dan cermin yang memfokuskan pada suatu area sel surya efisiensi tinggi.

2.3.2. Inverter

Inverter berfungsi untuk mengkonversi arus searah (DC) menjadi arus bolak-balik (AC).

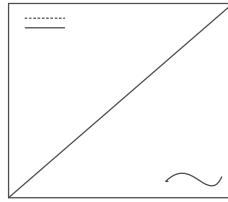
Selain itu, fungsi *inverter* adalah untuk menaikkan tegangan karena tegangan DC dari PLTS berada posisi rendah.

Tabel 2.1. Klasifikasi tegangan terhubung Jaringan PLN [18]

ELV	Tegangan ekstra rendah	Tidak lebih dari 33V AC RMS atau 70V DC
LV	Tegangan rendah	Lebih dari tegangan ELV tetapi tidak lebih dari 1000V AC atau 1500V DC
HV	Tegangan tinggi	Tegangan yang lebih besar dari LV

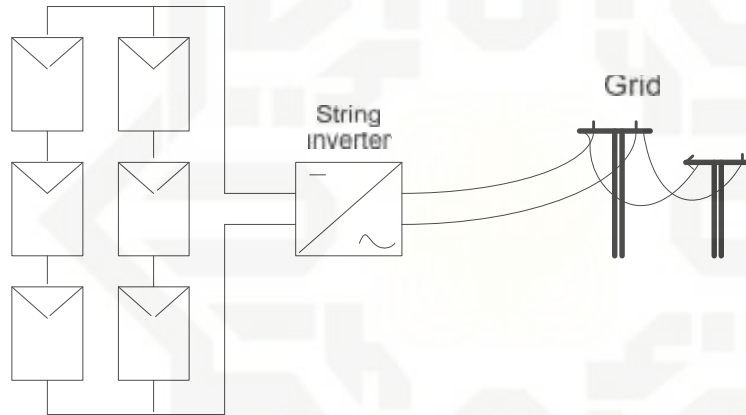
Inverter bertegangan rendah digunakan untuk mensuplai tegangan ke perumahan atau gedung-gedung komersial yang kecil. Gedung-gedung tersebut bertegangan 220V 1 fasa atau 380 AC untuk 3 fasa. Sedangkan tegangan tinggi digunakan untuk mensuplai tegangan pada

gedung-gedung besar yang mempunyai travo penurunan tegangan (step down) hingga 220V atau 380V. Simbol *inverter* ditunjukkan pada gambar 2.16 berikut ini:



Gambar 2.17. Simbol *Inverter* [18]

Inverter Tersambung Jaringan PLN (*on-grid*) dan *Inverter* Tidak Tersambung Jaringan PLN (*off grid*) Sistem PLTS tersambung dengan jaringan PLN menghubungkan langsung antara PLTS ke jaringan PLN dengan *inverter* tersambung dengan jaringan PLN (*on-grid*). Skema sistem *inverter* terhubung ke jaringan ditunjukkan pada gambar 2.17 berikut ini:



Gambar 2.18. Skema untuk sistem PLTS *on-grid* [18]

Inverter on-grid adalah sebuah alat yang dapat mengirimkan daya panel ke jaringan PLN. PLTS harus dikonfigurasi tegangan operasinya berdasarkan spesifikasi dari *inverter* untuk disambungkan ke tegangan PLN. *Inverter* akan mengubah daya DC dari solar panel menjadi AC dimana frekuensi dan tegangan AC yang akan disuplai harus sama dengan frekuensi dan tegangan jaringan PLN yaitu sebesar 60 Hz. Terdapat MPPT yang digunakan untuk menstabilkan daya.

Maximum Power Point Tracker (MPPT) adalah sebuah alat yang digunakan untuk terus mencari daya maksimum pada sebuah panel. Fungsinya adalah meyakinkan bahwa modul surya menghasilkan daya setinggi mungkin. Cara kerja dari MPPT adalah dengan membaca arus dan tegangan secara dinamis.



Inverter on-grid memiliki MPPT dengan spesifikasi minimum dan maksimum tegangan kerja. Fungsinya adalah sebagai penyedia daya keluaran PV dengan performa terbaik. Ketika tegangan PV array melebihi tegangan *inverter* maka MPPT dapat berfungsi sebagai sistem pengamanan karena tegangan berlebih dapat mengakibatkan kerusakan pada *inverter*.

Inverter off-grid tidak mempunyai MPPT seperti *inverter on-grid*. Pada *inverter off-grid* PV array tidak tersambung dengan *inverter* karena sebelum tegangan sampai ke *inverter*, tegangan terlebih dahulu melewati sistem kontroler untuk ke baterai.

Tabel 2.2. Perbedaan antara *inverter on-grid* dan *off-grid* [18]

<i>Inverter off-grid</i>	<i>Inverter on-grid</i>
Bisa menghasilkan keluaran 230V AC tanpa referensi gelombang AC lainnya	Membutuhkan gelombang AC lain dan dapat dipantau untuk menghasilkan dan menirukan listrik dan output gelombang sinus
Bisa menghasilkan variasi gelombang output: persegi atau disintesis sinus persegi	Hanya bisa menghasilkan gelombang sinus
Menghasilkan 220V AC dari bagian tegangan DC tertentu (umumnya tegangan baterai bank)	Umumnya sudah mempunyai MPPT didalamnya dan memiliki jendela tegangan DC dan bisa digunakan untuk memproduksi 220V AC
	Harus disesuaikan dengan IEC 62109-2

2.4. Perancang Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) *Grid Connected*

Dalam merancang pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) *grid connected* berpedoman pada buku *Planning and Installing Photovoltaic Systems: A Guide for Installers, Architects and Engineers* [20], adapun hal-hal terkait dalam melakukan perancangan adalah sebagai berikut:

2.4.1. Menentukan ukuran dan pemilihan modul

Sebuah daerah atau bangunan yang cocok untuk sistem panel surya yang telah disepakati dengan pelanggan selama kunjungan lokasi, terkait untuk survei bangunan yaitu: orientasi, tilt, area yang tersedia. Sistem panel surya tersebut di pilih berdasarkan spesifikasi modul surya yang diinginkan. Modul tersebut kemudian dipilih sesuai dengan:



- bahan sel: mono-kristal, *polyCrystalline*, *amorphous*, CdTe atau CIS, atau teknologi *Thinfilm*; dan
- Jenis Modul: Modul standar dengan / tanpa bingkai, modul kaca-kaca, genteng PV, dan lain-lain.

Untuk mendapatkan keuaran yang maksimal, dalam pengoperasian panel surya salah satu faktor yang mempengaruhi adalah suhu, berkurangnya daya panel surya terjadi saat suhu mengalami kenaikan. Pengurangan daya panel surya tersebut ditunjukkan melalui persamaan berikut:

$$P_{\text{saat } t \uparrow \text{ naik}} = 0.5\% / ^\circ \times P_{\text{mpp}} \times \Delta T \quad (2.3)$$

Dimana:

$P_{\text{saat } t \uparrow \text{ naik}}$ = Daya saat suhu naik dari suhu standar (W)

P_{mpp} = Daya keluaran maksimum panel (Wp)

ΔT = Kenaikan suhu dari temperatur standar ($^\circ$)

Daya maksimum panel surya saat temperatur lingkungan naik dari temperatur standarnya (25°) ditunjukkan pada persamaan berikut:

$$P_{\text{MPPsaat } t \uparrow \text{ naik}} = P_{\text{mpp}} - P_{\text{saat } t \uparrow \text{ naik}} \quad (2.4)$$

Dimana:

$P_{\text{MPPsaat } t \uparrow \text{ naik}}$ = Daya maksimal panel surya saat kenaikan temperatur (W)

P_{mpp} = Daya keluaran maksimum panel (Wp)

$P_{\text{saat } t \uparrow \text{ naik}}$ = Daya saat suhu naik dari suhu standar (W)

Dari persamaan 2.3 dan 2.4 diatas dapat digunakan untuk menghitung faktor koreksi suhu.

Faktor koreksi suhu (*temperature correction factor*) ditunjukkan pada persamaan berikut:

$$TCF = \frac{P_{\text{MPPsaat } t \uparrow \text{ naik}}}{P_{\text{mpp}}} \quad (2.5)$$

Dimana:

$P_{\text{MPPsaat } t \uparrow \text{ naik}}$ = Daya maksimal panel surya saat kenaikan temperatur (W)

P_{mpp} = Daya keluaran maksimum panel (W)

Dalam menentukan luas area energi panel surya dalam sistem pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) ditunjukkan pada persamaan berikut:

$$PV_{\text{area}} = \frac{E_L}{G_{\text{av}} \times \eta_{\text{pv}} \times TCF \times \eta_{\text{sistem}}} \quad (2.6)$$



Dimana:

PV_{area} = Luas area *array* (m^2)

E_L = Pemakaian energi (kWh/hari)

G_{av} = Radiasi matahari rata-rata harian (kWh/ m^2 /hari)

η_{pv} = Efisiensi panel surya (%)

TCF = Faktor koreksi suhu

η_{sistem} = Efisiensi Sistem PLTS (%)

Besar daya panel surya yang dibangkitkan oleh luas area *array* panel surya dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$P = PV_{area} \times PSI \times \eta_{pv} \quad (2.7)$$

Dimana:

P = Daya panel surya yang dibangkitkan luas area *array* (Wp)

PSI = *Peak Sun Insolation* (1000 W/ m^2)

η_{pv} = Efisiensi panel surya (%)

Dengan menggunakan persamaan 2.7 diatas, untuk menghitung jumlah panel surya yang dibutuhkan dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$Jumlah \text{ panel surya} = \frac{P}{P_{mpp}} \quad (2.8)$$

Dimana:

P = Daya panel surya yang dibangkitkan luas area *array* (Wp)

P_{mpp} = Daya keluaran maksimum panel (Wp)

Jenis modul tertentu dipilih berdasarkan spesifikasi tersebut, spesifikasi teknis modul menentukan ukuran sistem. Pertama, jumlah kasar modul yang dapat ditampung di daerah ditentukan. Gambar 4.1 dapat digunakan untuk perkiraan yang lebih tepat dari kebutuhan daerah tergantung pada bahan sel.



Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

- Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
- Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

Cell material	Required PV area for 1kW _p	
Mono-crystalline	7m ² –9m ²	
High performance cells	6m ² –7m ²	
Polycrystalline	7.5m ² –10m ²	
Copper indium diselenide (CIS)	9m ² –11m ²	
Cadmium telluride (CdTe)	12m ² –17m ²	
Amorphous silicon	14m ² –20m ²	

Gambar 2.19. Keperluan Area dari sistem panel surya

2.4.2. Menentukan Konsep Sistem

Konsep sistem ditentukan oleh komponen sistem *inverter*. Hal ini menyebabkan konsep sistem terpusat dan desentralisasi. Koneksi modul untuk membentuk *string* dan koneksi paralel mereka harus optimal dikoordinasikan dengan *inverter*. Tergantung pada toleransi modul, lebih besar atau lebih kecil kerugian dari ketidakcocokan yang terjadi ketika modul yang terhubung bersama-sama dalam *string*. Adapun beberapa konsep sistem *inverter* sebagai berikut:

a. Konsep *inverter* terpusat

Konfigurasi *Inverter* terpusat yang relatif sederhana dari pembangkit listrik tenaga surya fotovoltaik. Topologi penyambungan pembangkit tipe ini paling murah, karena hanya memiliki satu *inverter* DC ke AC terpusat untuk string modul fotovoltaik yang dihubungkan secara seri dan paralel untuk menghasilkan tegangan dan arus DC tertentu. Kelemahan lain adalah permasalahan keandalan sistem, dengan adanya gangguan atau kerusakan pada *inverter* maka akan menyebabkan seluruh pembangkit berhenti beroperasi.



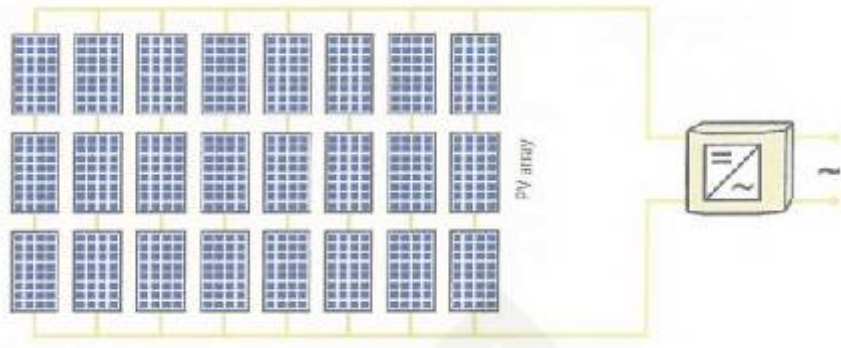
Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah,

b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

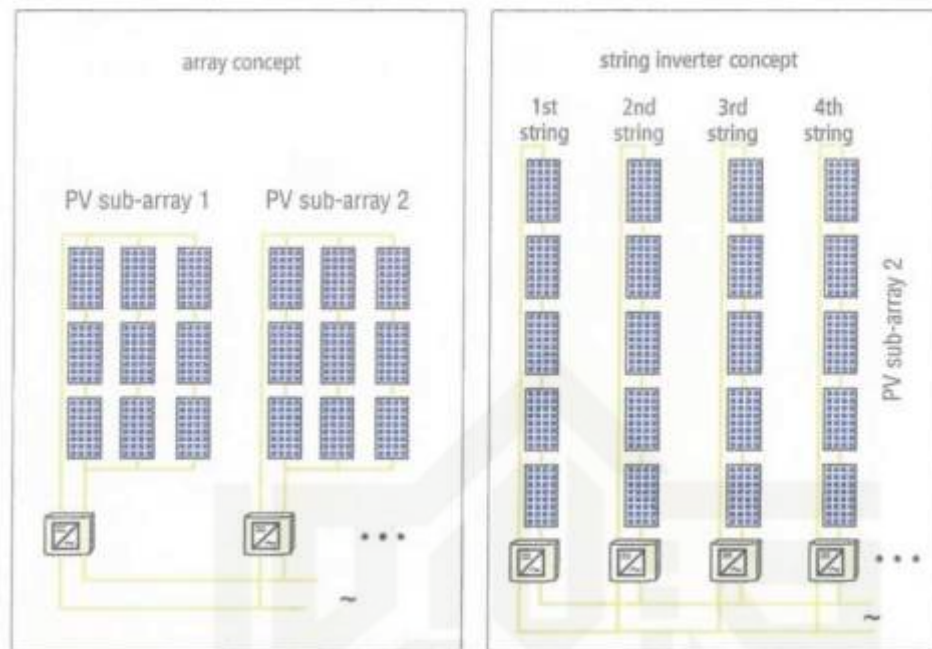
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.



Gambar 2.20. Konsep *inverter* terpusat

b. Konsep *Sub-array* dan *string inverter*

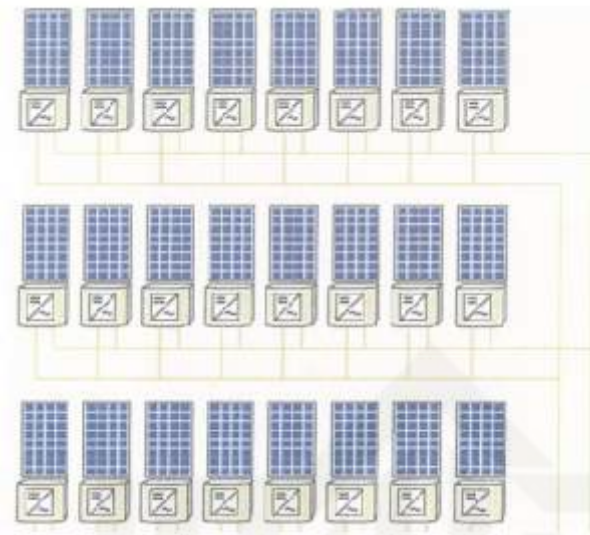
Dalam kebanyakan kasus, seluruh bentuk *array* yang sistem panel surya hanya memiliki satu *string*. sistem menengah sering memiliki dua atau tiga *string* terhubung ke *inverter*, sehingga menjadi konsep *sub-array*. Dengan sistem yang berorientasi diberbagai *sub-array*, konsep *sub-array* dan *string inverter* memungkinkan menghasilkan daya yang lebih baik dengan kondisi radiasi yang tersedia. *Inverter* digunakan per *sub-array* atau per *string*. Perawatan harus dilakukan untuk memastikan bahwa hanya modul dengan orientasi yang sama, sudut dan kebebasan dari warna yang terhubung bersama-sama dalam sebuah *string*. Dengan *string* yang terlalu panjang, efek bayangan dapat menyebabkan kerugian daya yang lebih besar karena modul dengan sedikit radiasi menghasilkan arus *string*. Menggunakan *string inverter* dapat memfasilitasi instalasi lebih mudah dan cukup dapat mengurangi biaya instalasi.



Gambar 2.21. Konsep *sub-array* dan *string inverter*

c. Konsep *Inverter Modul*

Konfigurasi *inverter modul* dimana setiap modul fotovoltaik memiliki *inverter DC/AC* dan *Maximum Power Point Tracking (MPPT)*. Keuntungan dari konfigurasi ini adalah desain yang sangat fleksibel sehingga mudah untuk menambahkan *inverter* guna meningkatkan kapasitas pembangkit listrik. Selain itu konfigurasi ini meningkatkan produksi energi dengan cara mengurangi kerugian energi dari ketidaksesuaian *inverter* dan meningkatkan keandalan. Kelemahan dalam konfigurasi ini adalah diperlukan biaya tambahan untuk *inverter* dan pemeliharaan yang relatif lebih kompleks.



Gambar 2.22. Konsep *inverter* modul

2.4.3. Menentukan Lokasi Instalasi *Inverter*

Ketika memilih lokasi instalasi, sangat penting bahwa kondisi lingkungan yang ditetapkan oleh pabrikan dipertahankan (dasarnya kelembaban dan suhu). Lokasi instalasi ideal untuk *inverter* adalah lokasi yang sejuk, kering, bebas debu dan di dalam ruangan. Hal tersebut memungkinkan untuk menginstal *inverter* disebelah kotak meteran. Jika kondisi lingkungan memungkinkan, *inverter* dapat diinstal dekat dengan PV array yang dekat dengan *combiner/**junction box*. Hal ini akan mengurangi panjang kabel utama DC dan menurunkan biaya instalasi.

Kisi-kisi ventilasi perlu terus ditemukan untuk memastikan pendinginan optimal. Untuk alasan yang sama, perangkat tidak harus dipasang tepat di atas satu sama lain, dimana hal ini sebaiknya dapat dihindari. Kebisingan yang dihasilkan oleh *inverter* juga harus diperhitungkan ketika memilih lokasi instalasi. Unit harus dilindungi dari uap agresif, uap air dan partikel halus. Misalnya, di lumbung atau kandang, uap amonia dapat timbul yang dapat merusak *inverter*. *Inverter* terpusat yang lebih besar sering dipasang dalam lokasu *inverter* secara terpisah dan bersama-sama dengan peralatan pelindung, meter dan *switchgear*. *String inverter* semakin sering digunakan dalam aplikasi eksterior pada atap atau di tempat lain di luar ruangan. Perangkat ini memiliki IP 54 perlindungan dan dapat menahan kondisi cuaca di luar ruangan. Namun, masih dianjurkan bahwa *inverter* dilindungi dari sinar matahari langsung dan hujan



untuk memberikan pengaruh positif pada kehidupan pelayanan mereka. Selain itu, aksesibilitas harus dijamin dalam hal kesalahan untuk memungkinkan perbaikan *inverter*. Jika kondisi lingkungan memungkinkan, masuk akal untuk menginstal PV *inverter* dekat dengan PV array yang kotak combiner / persimpangan. Hal ini mengurangi kerugian daya melalui kabel utama DC dan menurunkan biaya instalasi.

2.4.4. Menentukan Ukuran *inverter*

Setelah memilih konsep sistem *inverter* yang akan digunakan, maka langkah selanjutnya adalah menentukan ukuran *inverter* yang digunakan. Setelah memilih pabrikan dan kapasitas *inverter* maka perlu dilakukan penyesuaian *array* dan *inverter*, dengan tujuan agar *inverter* dapat bekerja dan tidak membuat kerusakan pada *inverter*. Adapun langkah-langkah dalam melakukan penyesuaian *array* dan *inverter* adalah sebagai berikut:

a. Menentukan maksimum modul dalam seri

Jumlah modul dalam seri ditentukan oleh tegangan *open circuit* (V_{oc}), karena tegangan bergantung pada temperature, maka V_{oc} harus sesuai dengan koreksi temperatur dalam langkah menghitung maksimum tegangan sistem panel surya. Temperatur koreksi V_{oc} akan menentukan jumlah maksimum modul yang diperbolehkan per seri. Langkah pertama yang dilakukan adalah menentukan perbedaan temperatur lokasi proyek, dalam kasus ini yaitu temperature terendah. Untuk menghitung maksimum modul dalam seri dapat menggunakan persamaan berikut:

$$V_{oc_{max}} = V_{oc} + (T_{low} - T_{STC}) \times T_{coeffV_{oc}} \times V_{oc} \quad (2.9)$$

Dimana:

$V_{oc_{max}}$ = Tegangan *open-circuit* maksimal (V)

V_{oc} = Tegangan *open-circuit* (V)

T_{low} = Temperatur terendah ($^{\circ}\text{C}$)

T_{STC} = Temperatur standar (25°C)

$T_{coeffV_{oc}}$ = Koefisien temperatur V_{oc} ($\%/^{\circ}\text{C}$)

Jumlah maksimum modul dalam seri harus lebih kecil atau sama dengan tegangan masukan maksimal DC *inverter* dibagi dengan tegangan *open-circuit* maksimal,



Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

- Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
- Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

Dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$N_{max} \leq \frac{V_{dc_inv}}{V_{oc_max}} \quad (2.10)$$

b. Minimum modul dalam seri

Tegangan operasi minimum *inverter* dapat dihitung menggunakan tegangan maksimum modul (V_{mp}) pada rata-rata temperature lingkungan tertinggi. Dalam megestimasi temperatur sel yang nyata, membutuhkan faktor kenaikan temperatur (T_{rise}) yang dihasilkan dari kondisi temperatur lingkungan. Dalam menghitung minim modul dalam seri dapat menggunakan persamaan berikut:

$$V_{mp_min} = V_{mp} + (T_{rise} + T_{high} - T_{STC}) \times (T_{coeffVmp} \times V_{mp}) \quad (2.11)$$

Dimana:

V_{mp_min} = Tegangan operasi minimum (V)

V_{mp} = Tegangan modul (V)

T_{rise} = Kenaikan temperatur dari terendah ke tertinggi (°C)

T_{high} = Temperatur tertinggi (°C)

T_{STC} = Temperatur standar (25°C)

$T_{coeffVmp}$ = Koefisie temperatur V_{mp} (%/°C)

Jumlah minimum modul dalam seri harus lebih besar atau sama dengan tegangan masukan *inverter* dibagi dengan tegangan operasi minimum panel surya, dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$N_{min} \geq \frac{V_{dc_inp_inv}}{V_{mpp_min}} \quad (2.12)$$

c. Menentukan maksimum *string* dalam parallel

Untuk menghitung jumlah maksimum *string* dalam parallel, dapat membagi arus maksimum masukan *inverter* dengan arus modul surya. Jumlah maksimum *string* dalam parallel harus lebih kecil atau sama dengan arus maksimum masukan *inverter* dibagi dengan arus modul surya, dihitung dengan menggunakan persamaan berikut:

$$N_{max} \leq \frac{I_{max_inv}}{I_{mp}} \quad (2.13)$$



1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber.

a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.

b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

d. Menentukan kapasitas maksimum *array*

Langkah terakhir dalam melakukan penyesuaian *array* dengan *inverter* yaitu dengan menghitung daya maksimum *array*. Beberapa konfigurasi *array* dapat tidak mengirimkan tegangan atau arus yang cukup, sehingga akan mempengaruhi keluaran *inverter*. Jika hal ini terjadi, maka nilai energi surya yang dibangkitkan menjadi energi listrik menghilang kelingkungan berupa panas.

Salah satu cara untuk menyesuaikan masukkan *array* dengan keluaran *inverter* yaitu dengan mengetahui nilai PTC (PV Test Condition) dari modul surya, karena keluaran modul surya tidak sama dengan spesifikasi pabrikan, sehingga nilainya lebih kecil daripada yang dirancang oleh pabrikan. Nilai PTC dapat dihitung dengan mengkalikan nilai daya spesifikasi pabrikan dengan faktor *derating* yaitu 0.9. Dalam menghitung kapasitas maksimum *array* dapat menggunakan persamaan berikut:

$$N \leq \frac{P_{inv}}{PTC \times \eta_{inv}} \quad (2.14)$$

2.4.5. Menentukan ukuran kabel

Kabel adalah bagian penting dari desain sistem PLTS, baik untuk alasan keselamatan dan efisiensi. Ukuran kabel harus benar sesuai konduktor dan isolasi apabila kabel berukuran dibawah kemampuannya maka kabel dapat menyebabkan bahaya kebakaran. Ukuran kabel yang benar adalah akan minimal drop tegangan dan ukuran kabel tidak lebih besar saat ini dalam kabel tidak akan lebih besar dari kemampuan kabel. Ada arus dan tegangan di berbagai bagian dari sistem PV yang berbeda. Oleh karena itu kabel sistem PV dibagi menjadi *string*, *array* dan kabel AC. Menghitung ukuran kabel modul dan *string* dapat menggunakan persamaan berikut:

$$A_M = \frac{2 \times L_M \times I_{st}}{1\% \times V_{MPP} \times k} \quad (2.15)$$

Dimana:

A_M = Luas penampang kabel (mm²)

L_M = panjang kabel (m)

I_{st} = Arus *String* (A)

V_{MPP} = Tegangan Panel (V)



k = Konduktansi tembaga (56 m/ /3mm²)

Nilai yang dihitung untuk penampang kabel A_M modul atau *string* dibulatkan ke nilai yang tertinggi. Rumus berikut ini digunakan untuk menghitung kerugian secara keseluruhan disemua kabel modul dan untuk penampang kabel *string*, sebagai berikut:

$$P_M = \frac{2 \times n \times L_M \times I_{st}^2}{A_M \times k} \quad (2.16)$$

Dimana:

P_M = Kerugian Daya sepanjang Kabel (W)

A_M = Luas penampang kabel (mm²)

L_M = panjang kabel (m)

I_{st} = Arus *String* (A)

k = Konduktansi tembaga (56 m/ /3mm²)

n = Jumlah *string*

Kabel DC utama dan kabel bus DC dari *sub-array* panel surya harus dapat membawa maksimum arus yang dihasilkan oleh *array* panel surya. Penampang kabel DC utama dapat diptimalkan didalam energi dengan menggunakan rumus berikut, diasumsikan aka nada kerugian kabel 1 % dari daya nominal dari *array* panel surya:

$$A_{DC\ cable} = \frac{2 \times L_{DC\ Cable} \times I_n^2}{(v \times P_{PV} - P_M) \times k} \quad (2.17)$$

Dimana:

$A_{DC\ cable}$ = Luas penampang kabel (mm²)

$L_{DC\ Cable}$ = panjang kabel (m)

I_n = Arus nominal *Array* (A)

k = Konduktansi tembaga (56 m/ /3mm²)

P_{PV} = Nominal Daya *Array* (W)

P_M = Kerugian Daya sepanjang Kabel (W)

Rugi daya pada kabel DC utama dapat dihitung menggunakan persamaan berikut ini:

$$P_{DC\ Cable} = \frac{2 \times L_{DC\ Cable} \times I_n^2}{A_{DC\ cable} \times k} \quad (2.18)$$



Dimana:

$P_{DC\ Cable}$	= Kerugian Daya sepanjang Kabel (W)
$A_{DC\ cable}$	= Luas penampang kabel (mm^2)
$L_{DC\ Cable}$	= panjang kabel (m)
I_n	= Arus nominal <i>Array</i> (A)
k	= Konduktansi tembaga (56 m/ $\sqrt{3}mm^2$)

Selain kabel DC, terdapat pula kabel koneksi AC yang menghubungkan keluaran energi listrik dari *inverter* menuju panel listrik utama. Ukuran kabel AC mengamsusikan tegangan jatuh sebesar 3% terhadap tegangan nominal *grid*, dengan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$A_{AC\ cable} = \frac{2 \times L_{AC\ Cable} \times I_{n\ AC} \times \cos \phi}{3\% \times V_n \times k} \quad (2.19)$$

Dimana:

$A_{DC\ cable}$	= Luas penampang kabel (mm^2)
$L_{AC\ Cable}$	= panjang kabel (m)
$I_{n\ AC}$	= Arus nominal Keluaran <i>Inverter</i> (A)
k	= Konduktansi tembaga (56 m/ $\sqrt{3}mm^2$)
V_n	= Nominal tegangan <i>grid</i> (V)

2.4.6. Menentukan Sistem Pengaman

a. DC *Disconnecter* pada PLTS

DC *Disconnecter* pada PLTS ialah sebuah alat yang sama jenisnya dengan DC *circuit braker*. Alat ini digunakan sebagai saklar penghubung dan memutus. Namun, harus dipasang pada arus DC. Alat ini biasanya dipasang diantara PLTS dan inverter. Alat ini terbagi dua yaitu isolator yang memiliki polaritas dan isolator yang tidak memiliki polaritas. Dalam menentukan ukuran pemutus DC ini menggunakan rumus sebagai berikut:

$$I_{DC\ MS} = I_{SC\ Array} \times 1.56 \quad (2.20)$$



Dimana :

$I_{DC\ MS}$ = Kapasitas Arus dalam pemutus (Ampere)

$I_{SC\ Array}$ = Arus yang mengalir dalam *Array* (Ampere)

b. AC *Disconnecter* pada PLTS

Peletakan isolasi saklar manual harus dipasang diantara inverter dan jaringan listrik. Ini di anjurkan untuk menempatkan bahwa sisi inverter yang terdapat perangkat metering PLTS. Dalam menentukan ukuran pemutus AC ini menggunakan rumus sebagai berikut:

$$I_{AC\ MS} = I_{N\ Inverter} \times 1.25 \quad (2.21)$$

Dimana :

$I_{AC\ MS}$ = Kapasitas Arus dalam pemutus (Ampere)

$I_{N\ Inverter}$ = Arus Keluar dalam *Inverter* (Ampere)

2.5. Aspek Teknik Pembangkit Listrik Tenaga Surya

Dalam merancangan sistem PLTS penting untuk dapat memperkirakan hasil energi dari sistem itu. Jumlah energi yang dihasilkan oleh sistem PV tergantung pada sejumlah faktor, tetapi faktor utama adalah ukuran *array* panel surya dan jumlah radiasi matahari harian rata-rata. Adapun dalam menganalisa hasil perancangan pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) dilihat melalui faktor sebagai berikut:

2.5.1. Rasio Performa (*Performance Ratio*)

Rasio performa didefinisikan sebagai rasio dari jumlah sebenarnya energi PV dikirim ke jaringan utilitas dalam jangka waktu tertentu dengan jumlah teoritis energi yang dihasilkan oleh modul PV di bawah kondisi uji standar (STC).

2.5.2. Faktor kapasitas (*Capacity Factor*)

Faktor kapasitas / *Capacity Faktor* pembangkit listrik adalah rasio output aktual dari pembangkit listrik selama periode waktu dan output potensial jika telah beroperasi pada kapasitas penuh sepanjang waktu. Secara matematis, faktor kapasitas adalah jumlah total energi pabrik yang dihasilkan selama periode waktu dibagi dengan jumlah energi PLTS akan menghasilkan pada kapasitas penuh. Faktor kapasitas sangat bervariasi tergantung pada jenis bahan bakar yang digunakan dan desain pabrik. Hal ini juga menyediakan alat untuk



perbandingan kinerja dari berbagai jenis pembangkit listrik. Rumus perhitungannya adalah sebagai berikut:

$$\text{Capacity factor} = \frac{\text{Hasil produksi listrik}}{\text{kapasitas PV} \times \frac{365 \text{ day}}{\text{year}} \times 24 \text{ h/day}} \quad (2.22)$$

2.6. Aspek Ekonomi Pembangkit Listrik Tenaga Surya

Dalam pembangunan pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) aspek ekonomi yang diperhatikan adalah aspek biaya dan aspek finansial.

2.6.1. Aspek Biaya

Aspek biaya pada pembangunan pembangkit listrik tenaga surya meliputi biaya investasi awal, biaya operasi dan perawatan, dan biaya penggantian, adapun aspek biaya tersebut dijelaskan sebagai berikut:

1. Biaya Investasi

Biaya investasi (*Investment Cost*) merupakan biaya yang ditanamkan dalam rangka kebutuhan usaha untuk siap beroperasi dengan baik. Biaya ini biasanya dikelurakan pada awal awa kegiatan usaha dalam jumlah yang relatif besar dan berdampak jangka panjang untuk kesinambungan usaha tersebut. Pada perancangan pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) biaya investasi nya meliputi biaya komponen PLTS dan biaya instalasi.

2. Biaya Operasi dan *Maintenance* (O&M)

Biaya O&M pertahun untuk PLTS umumnya diperhitungkan sebesar 1% dari total biaya investasi awal.

3. Biaya Penggantian (*replacement*)

Biaya investasi ini meliputi biaya penggantian *inverter* sesuai periode dari spesifikasi peralatan.

Aspek biaya dalam pembangunan pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) ini menggunakan metode *Life Cycle Cost Analysis* (LCCA). *Life Cycle Cost Analysis* merupakan teknik manajemen yang digunakan untuk mengidentifikasi dan memonitor biaya proyek selama siklus hidupnya.

2.6.2. Aspek Finansial

Dalam menentukan suatu proyek layak dibangun atau tidak, salah satu caranya yaitu dengan melakukan analisa aspek finansial. Aspek finansial yang terkait dalam penentuan kelayakan pembangkit listrik tenaga surya (PLTS), sebagai berikut:

1. *Net Present Value (NPV)*

NPV adalah metode yang digunakan untuk menghitung nilai bersih pada waktu sekarang. Teknik ini menghitung selisih antara seluruh kas bersih nilai sekarang dengan investasi awal yang ditanamkan. Keterangan pengambilan keputusannya adalah sebagai berikut:

- Jika nilai NPV yang didapatkan adalah positif maka proyek tersebut layak dilaksanakan karena hal itu mengindikasikan bahwa perhitungan investasi proyek itu telah mencapai kondisi yang mampu memberi keuntungan sampai periode yang diperhitungkan.
- Jika nilai NPV yang didapatkan adalah negatif maka proyek tersebut tidak layak dilaksanakan karena hal itu mengindikasikan bahwa perhitunganninvestasi proyek itu belum mencapai kondisi yang mampu memberi keuntungan sampai periode yang diperhitungkan.
- Jika nilai NPV yang didapatkan adalah 0 maka itu berarti dalam sepanjang periode perhitungan investasi yang dilakukan maka proyek tersebut telah memberikan hasil yang sebanding dengan nilai investasi yang dikeluarkan.

2. *Internal Rate of Return (IRR)*

Internal Rate of Return (IRR) merupakan nilai discount rate yang membuat nilai NPV suatu proyek sama dengan nol. Berdasarkan perhitungan IRR, apabila nilai IRR lebih besar daripada tingkat bunga relevan (tingkat keuntungan yang disyaratkan), maka investasi dikatakan menguntungkan. Sebaliknya jika nilai IRR lebih kecil tingkat bunga relevan maka investasi dikatakan merugikan dan tidak layak untuk dilaksanakan.

3. *Pay Back Periode (PBP)*

Pay Back Periode adalah Pengembalian modal adalah analisis ekonomi pada sistem PV *grid-connected* metode paling mudah untuk dipahami. Dalam PLTS *Pay Back Periode* bertujuan menghitung jumlah waktu yang diperlukan untuk memulihkan biaya Investasi berdasarkan penghematan biaya energi tahunan.



2.7. Kebijakan Energi Terbarukan di Indonesia

Pengembangan energi baru terbarukan (EBT) di Indonesia diatur dalam Peraturan Presiden (Perpres) No. 5 tahun 2006 tentang Kebijakan Energi Nasional. Dalam Perpres tersebut dinyatakan bahwa kontribusi untuk EBT dalam bauran energi primer nasional untuk tahun 2025 adalah 17% dengan bagian untuk energi dari tenaga surya dan tenaga angin sebesar 5%.

Penjualan listrik dari pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) diatur dalam peraturan menteri (Permen) ESDM No. 50 Tahun 2017. Permen tersebut mengenai pemanfaatan sumber energi terbarukan untuk penyediaan tenaga listrik. Pada permen tersebut dalam bab 4 bagian kedua mengenai pembelian tenaga listrik dari PLTS fotovoltaik yang pada pasal (3) pembelian tenaga listrik dari PLTS paling tinggi 85% dari BPP pembangkitan di sistem ketenagalistikan setempat. Dalam merealisasikan peraturan menteri ESDM ini, PT. PLN menerbitkan Peraturan Direksi PT. PLN (Persero) Nomor 0733.K/DIR/2013 tentang pemanfaatan energi listrik dari fotovoltaik oleh pelanggan PT. PLN (Persero). Peraturan ini memuat tentang proses migrasi dari meteran regular (umum) menjadi meteran *existing* (meteran 2 arah) sehingga produksi energi listrik dari sistem PLTS oleh pelanggan dapat dikirim menuju ke jaringan PT. PLN (Persero).

Dalam *draft* Rancangan Peraturan Presiden Republik Indonesia tentang Kebijakan Energi Nasional (KEN) 2010-2050, pemerintah telah membuat kebijakan terkait energi surya. Kebijakan tersebut diantaranya adalah penerapan kebijakan penggunaan sel surya pada pemakaian tertentu seperti industri besar, gedung komersial, rumah mewah serta PLN. Sejalan dengan peraturan itu, pemerintah juga akan menggalakkan industri sistem dan komponen peralatan instalasi Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS), mewujudkan keekonomian PLTS, meningkatkan penguasaan teknologi PLTS dan surya termal dalam negeri melalui penelitian dan pengembangan serta pembelian lisensi [16].

2.8. Perangkat Lunak yang Digunakan

2.8.1. PVSyst

PVSYST V6.53 adalah paket perangkat lunak PC untuk studi, ukuran dan analisis data dari sistem PV lengkap. Ini berkaitan dengan sistem PV grid-connected, berdiri sendiri, memompa dan DC-grid (angkutan umum), dan termasuk luas meteo dan PV sistem komponen database, serta umum alat energi surya. Perangkat lunak ini ditujukan untuk kebutuhan arsitek,



insinyur, peneliti. Hal ini juga sangat membantu untuk pelatihan pendidikan. PVSYST V6.53 menawarkan 3 tingkat studi sistem PV, kira-kira sesuai dengan tahapan yang berbeda dalam pengembangan proyek nyata:

1. Desain awal (*Preliminary design*): ini adalah langkah *pre-sizing* proyek.

Dalam mode ini evaluasi hasil sistem dilakukan dengan sangat cepat dalam nilai-nilai bulanan, hanya menggunakan sangat sedikit karakteristik sistem umum atau parameter, tanpa menentukan komponen sistem yang sebenarnya. Sebuah perkiraan kasar dari biaya sistem juga tersedia.

Untuk sistem grid-connected, dan terutama untuk membangun integrasi, tingkat ini akan arsitek-oriented, yang membutuhkan informasi tentang daerah yang tersedia, teknologi PV (warna, transparansi, dll), daya yang diperlukan atau investasi yang diinginkan.

Untuk sistem yang berdiri sendiri alat ini memungkinkan untuk ukuran daya PV dan baterai kapasitas yang diperlukan, mengingat profil beban dan probabilitas bahwa pengguna tidak akan puas.

Untuk sistem pompa, kebutuhan air diberikan dan kedalaman untuk memompa, dan menentukan beberapa pilihan teknis umum, alat ini mengevaluasi kekuatan pompa dan ukuran array PV diperlukan. Adapun sistem yang berdiri sendiri, ukuran ini dapat dilakukan sesuai dengan probabilitas tertentu yang kebutuhan air tidak terpenuhi sepanjang tahun.

2. Desain Proyek (*Project Design*): bertujuan untuk melakukan desain sistem menyeluruh menggunakan simulasi jam rinci. Dalam kerangka "proyek", pengguna dapat melakukan simulasi sistem yang berbeda berjalan dan membandingkan mereka. Dia harus menentukan orientasi pesawat (dengan kemungkinan pelacakan pesawat atau gudang pemasangan), dan untuk memilih komponen sistem tertentu. Dia dibantu dalam merancang PV array (jumlah modul PV secara seri dan paralel), diberi pilihan model yang *inverter*, baterai atau pompa. Pada tahap kedua, pengguna dapat menentukan parameter yang lebih rinci dan menganalisis efek baik seperti perilaku termal, kabel, kualitas modul, ketidakcocokan dan sudut datang kerugian, horizon (jauh shading), atau nuansa parsial dekat objek pada array, sebuah sebagainya .



3. Untuk sistem pemompaan, beberapa desain sistem dapat diuji dan dibandingkan satu sama lain, dengan analisis rinci tentang perilaku dan efisiensi. Hasil mencakup beberapa puluhan variabel simulasi, yang dapat ditampilkan dalam nilai-nilai bulanan, harian atau per jam, dan bahkan ditransfer ke perangkat lunak lain. "Rugi Diagram" sangat berguna untuk mengidentifikasi kelemahan dari desain sistem. Sebuah laporan insinyur dapat dicetak untuk setiap simulasi dijalankan, termasuk semua parameter yang digunakan untuk simulasi, dan hasil utama. Evaluasi ekonomi rinci dapat dilakukan dengan menggunakan harga komponen nyata, biaya tambahan dan kondisi investasi.
4. Database: manajemen database - untuk data dan PV meteorologi komponen.
Pembuatan dan pengelolaan situs geografis, generasi dan visualisasi data meteorologi jam, impor data meteorologi dari beberapa sumber yang telah ditetapkan atau dari file ASCII kustom. Manajemen database dari produsen dan komponen PV, termasuk modul PV, *Inverter*, *Regulator*, *Generator*, *Pompa*, dll.

2.8.2. RETScreen

RETScreen International Project Clean Energy Analysis Software adalah alat terkemuka khusus ditujukan untuk memfasilitasi pra-kelayakan dan analisa kelayakan teknologi energi bersih. Inti dari alat ini terdiri dari analisa proyek standar dan terintegrasi *software* yang dapat digunakan di seluruh dunia untuk mengevaluasi biaya produksi energi, siklus hidup dan pengurangan emisi gas rumah kaca untuk berbagai jenis energi yang diusulkan efisien dan teknologi energi terbarukan. Semua model teknologi energi bersih di RETScreen yang *Software* memiliki tampilan umum dan mengikuti pendekatan standar untuk memfasilitasi pengambilan keputusan Setiap model juga mencakup terintegrasi produk, biaya dan database cuaca dan user manual yang rinci secara online, semua yang membantu untuk secara dramatis mengurangi waktu dan biaya yang terkait dengan mempersiapkan studi pra-kelayakan. *Software* RETScreen mungkin yang tercepat dan termudah alat untuk estimasi kelangsungan hidup potensial proyek energi bersih.

RETScreen menyediakan akses ke database iklim global berdasarkan pengukuran tanah dan data satelit NASA, analisa proyek di seluruh dunia yang memungkinkan. Perangkat lunak ini tersedia dalam 35 bahasa dan termasuk database peralatan untuk komponen yang diproduksi



dan tersedia di seluruh dunia. sumber pelatihan untuk belajar sendiri, digunakan dalam program pelatihan atau program universitas termasuk webcast, slide presentasi, dan catatan instruktur, studi kasus, pengguna dan bahan lainnya.

2.8.3. Autodesk AutoCAD 2017

AutoCAD adalah sebuah perangkat lunak CAD yang berfungsi untuk menggambar/mendesain sebuah objek 2 dimensi maupun 3 dimensi dengan sistem CAD. AutoCAD adalah software desain yang paling populer di dunia karena keunggulannya dalam mengembangkan produk-produknya. AutoCAD dikembangkan oleh Autodesk yang memiliki banyak versi mulai dari versi pertama yang dikeluarkannya adalah 1.0 (tahun 1982) sampai dengan versi yang sekarang. AutoCAD terus berinovasi dengan mengeluarkan versi-versi terbarunya dan fitur-fitur yang lebih menarik tentunya.

AutoCAD biasa digunakan oleh seorang Insinyur Sipil, Arsitek, Mesin, Listrik dan lain-lain. Pada zaman yang modern seperti sekarang Autocad sangat diminati khususnya untuk menggambar baik itu menggambar 2 dimensi ataupun 3 dimensi, karena dengan bantuan software ini akan memudahkan kita dalam mengerjakan pekerjaan menggambar dalam waktu yang relatif singkat dan tentunya memiliki kualitas gambar yang baik. Pada versi autoCAD 2017, terdapat beberapa fitur tambahan yang membedakan dari versi terdahulunya, fitur ini merupakan peningkatan atau penyempurnaan dari fitur yang sebelumnya sudah ada. Berikut adalah beberapa fitur baru yang telah disediakan pada autocad 2017 :

Import PDF

Perbaikan dan penyempurnaan fitur yang pertama ditambahkan pada Autocad 2017 adalah peningkatan fitur *Import Pdf*. Dengan peningkatan tersebut, pengguna dapat mengimpor vektor geometri, *TrueType* teks, dan *raster images* dari PDF langsung ke AutoCAD sebagai objek yang dapat diedit.

1. *Smart Centerlines and Center Mark*

Dari segi modeling, AutoCAD 2017 memiliki perbaikan untuk Centerlines. Sekarang, berkat fitur yang disebut "Smart Centerlines / Centerlines Pintar". Kemudahan akan anda rasakan ketika membuat dan mengedit centerlines atau Center mark, karena setiap kali Anda memindahkan objek, maka secara otomatis centerlines dan centermarks akan bergerak



mengikuti objek. Jadi anda tidak perlu repot-repot memindah centerlines / centermarks pada objek.

Selain kedua fitur diatas, ada fitur yang terbilang cukup menarik untuk dicoba yaitu *Smart Dimensioning*. Dengan adanya fitur ini, Penambahan dimensi dapat dilakukan secara otomatis berdasarkan gambar yang Anda buat. Dengan memilih objek yang akan diberikan dimensi, maka akan terlihat preview dimensi dari objek tersebut.

Autodesk telah membuat sejumlah perbaikan tambahan. Terutama pada versi 2017 akan datang dikemas dengan *Desktop App* Autodesk untuk mengelola pembaruan perangkat lunak. Dengan pendamping ini pengguna aplikasi dapat menerima patch keamanan yang paling *up-to-date* untuk versi sebelumnya dari AutoCAD dan setiap pembaruan nantinya tanpa mengganggu alur kerja mereka. Selain *App Desktop*, Autodesk telah difokuskan pada peningkatan stabilitas grafis 3D sambil terus meningkatkan kinerja alat grafis 2D.

Dari ketiga perangkat lunak (*software*) yang dijelaskan diatas, masing-masing perangkat lunak memiliki peranan yang berbeda dalam perancangan pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) di stasiun pengisian bahan bakar umum (SPBU). *Software* PVSyst digunakan untuk merancang pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) *grid-connected* berdasarkan aspek teknik. *Software* RETScreen digunakan untuk menganalisa biaya dan finansial pada perancangan pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) dan juga menentukan kelayakan perancangan pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) secara finansial. *Software* Autocad 2017 digunakan untuk membuat gambar teknik atau *site plan* dari perancangan pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) yang terintegrasi dengan bangunan stasiun pengisian bahan bakar umum (SPBU), sehingga dalam penelitian ini dihasilkan cetak biru (*blueprint*) dari perancangan pembangkit listrik tenaga surya (PLTS). Perangkat lunak (*software*) ini digunakan untuk mendapatkan hasil yang lebih akurat dan detail, serta dengan adanya penggunaan *software* ini akan menghemat waktu dan biaya dalam proses penelitian.